

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА**

ОСНОВИ ТОПОГРАФІЇ

Навчальний посібник для студентів
геологічних спеціальностей

ЛЬВІВ – 2015

Основи топографії: навчальний посібник для студентів геологічних спеціальностей / укл.: Л.М. Хом'як. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка, 2015. – 96 с.

Укладач: кандидат геологічних наук *Л.М. Хом'як*

Рецензент: канд. техн. наук, доцент *С.С. Кравців*
(Львівський національний університет імені Івана Франка)

Відповідальний за випуск:
завідувач кафедри загальної та регіональної геології,
професор *А.О. Сіворонов*

Редактор: *Лариса Сідлович*

Відповідальний за друк: *Олена Старунько*

*Затверджено
на засіданні Вченої ради
геологічного факультету
(протокол № 21/4 від 22 квітня 2015 р.)*

	Стор.
Вступ	2
1. Форма та розміри Землі	3
2. Системи координат для визначення положення точок земної поверхні	9
2.1. Система географічних координат	10
2.2. Системи прямокутних координат	12
2.3. Полярна система координат	21
2.4. Зв'язок плоскої прямокутної та полярної систем координат	21
2.5. Висота точок	23
3. Кути напрямків і зв'язок між ними	24
3.1. Кути напрямків	24
3.2. Визначення кутів напрямків на топографічних картах	28
3.3. Зв'язок між дирекційними кутами і кутами повороту ліній напрямків	30
4. Розграфлення та номенклатура топографічних карт і планів	31
5. Рельєф місцевості та його відображення на топографічних картах	39
6. Вимірювання довжин ліній на місцевості	48
6.1. Засоби для вимірювання відстаней безпосереднім способом	48
6.2. Методика вимірювання відстані на місцевості мірними стрічками (або рулетками)	52
6.3. Визначення відстані до недосяжних об'єктів	55
6.4. Вимірювання відстаней посереднім способом	55
6.5. Визначення горизонтальних проєкцій ліній місцевості	61
7. Кутіві вимірювання у геодезичних роботах	63
7.1. Принцип вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів	63
7.2. Порядок вимірювання горизонтальних кутів	67
7.3. Порядок вимірювання вертикальних кутів	70
8. Вимірювання перевищень	74
8.1. Геометричне нівелювання	74
8.2. Тригонометричне нівелювання	79
8.3. Барометричне нівелювання	80
8.4. Гідростатичне нівелювання	82
9. Супутникові системи навігації	83

ВСТУП

Цей посібник призначений для студентів геологічних, екологічних та інших спеціальностей з подібною програмою вивчення дисципліни “Топографія”. Його написання зумовлено потребою в забезпеченні навчального процесу методичною розробкою, яка би відповідала завданням і змістові лекційного курсу в обсязі, регламентованому кількістю годин на вивчення згаданої дисципліни.

За останнє десятиліття видано цілу низку підручників і посібників з геодезії та топографії. Зазвичай це об’ємні праці з розгорнутим викладенням матеріалу, зорієнтовані на студентів відповідних напрямів підготовки. Згідно з тематикою видання, вибраною автором структурою та послідовністю висвітлення матеріалу, споріднені питання нерідко розглядаються у різних розділах. Детальність, розрізненість базових понять і відомостей з топографії у викладі матеріалу спеціалізованих видань утруднює вивчення цієї дисципліни студентами інших напрямів підготовки.

У пропонованому посібнику зроблена спроба лаконічно, з урахуванням професійної специфіки, в доступній формі подати лекційний матеріал курсу топографії. Зміст перших чотирьох тем висвітлює відомості про елементи геодезичної основи топографічних карт. Розглянуто, зокрема, поняття референц-еліпсоїда, параметрів його орієнтування, перелік загальноземних еліпсоїдів, які використовують окремі країни, системи навігації або міжнародні організації. У п’ятій темі детально розглянуто спосіб відображення рельєфу на топографічних картах. Уміння аналізувати графічне зображення рельєфу важливе геологам для раціонального проектування робіт, фахового їх виконання у польових умовах і під час побудови геологічної карти. У наступних трьох темах висвітлено суть, принципи та ключові моменти методики виконання інструментальних вимірювань відстаней, кутів і перевищень на місцевості. Зважаючи на багатоцільове використання у наш час супутникових навігаційних систем, зокрема і в геології, останню тему присвячено описові структури та принципам роботи GPS.

Зазначений перелік тем і питань є необхідним як для підготовки фахівця геологічної спеціальності, так і для його професійної діяльності. Узагальнений або ж розширений розгляд тих чи інших питань геодезії та топографії дасть змогу, на думку автора, без труднощів віднайти, зрозуміти й опанувати потрібну інформацію.

1. ФОРМА ТА РОЗМІРИ ЗЕМЛІ

Поверхня Землі, яку прийнято називати фізичною або топографічною, представлена поєднанням водних просторів Світового океану та материків складних обрисів. Океани і моря займають майже 71 % поверхні планети, суша – лише 29 %. Поверхня Світового океану практично рівна, а суша має нерівності різних форм і розмірів. Найвищою горою на суходолі є Еверест (8848 м), а середня висота суші над рівнем океану становить лише 875 м. Проте усі нерівності земної поверхні незначні порівняно з її площею. Зважаючи на це, під загальним виглядом Землі, тобто під її теоретичною формою, прийнято розуміти випуклу поверхню, яка збігається з поверхнею Світового океану у стані повного спокою. Це підтверджують і знімки Землі, зроблені з космічних апаратів. Середні рівні окремих океанів і морів мають різні висоти, однак їхні різниці не перевищують одного метра і не мають істотного значення для вирішення питання про загальну форму та розміри Землі.

Завдяки рідкому агрегатному стану водних мас Світового океану, його поверхня легко змінюється, займаючи рівноважне положення до сили тяжіння Землі, відцентрової сили обертання та притягання Сонця і Місяця. Тому поверхню Світового океану у стані повного спокою та рівноваги називають *рівневою поверхнею*. Рівневу поверхню характеризують дві властивості: 1) потенціал сили тяжіння в усіх її точках має однакове значення; 2) прямовисні лінії (лінії, які збігаються з напрямком дії сили тяжіння) перпендикулярні до рівневої поверхні у будь-якій її точці. Таких поверхонь можна провести безліч через довільну точку фізичної поверхні, а також над або під нею.

Фігуру Землі, утворену рівневою поверхнею, яка збігається з поверхнею Світового океану у стані повного спокою та уявно продовжена під материками, називають геοїдом. Це поняття в науку ввів у 1873 р. німецький фізик і математик В. Лістінг. Форма уявної поверхні геοїда залежить від розподілу на поверхні Землі сили тяжіння, яка, у свою чергу, залежить від розподілу мас. Вимірюючи значення і напрямки сили тяжіння на поверхні Землі, можна визначити вигляд рівневої поверхні, а отже, і фігуру Землі.

Геοїд є геометрично неправильною фігурою, оскільки внутрішня будова Землі неоднорідна і напрямки дії сили тяжіння не збігаються з напрямками, які вони мали б за однорідної будови планети. Унаслідок цього рівнева поверхня, залишаючись перпендикулярною у кожній точці до прямовисних ліній, набуває складної та неправильної форми. Сучасні дані геології та геофізики свідчать

також про те, що розподіл мас у надрах Землі не є постійним, змінюється швидкість обертання та положення осі обертання планети, що зумовлює постійні зміни уявної поверхні геоїда. Форма та розміри такої фігури не підлягають визначенню, на неї неможливо переносити вимірювання, зроблені на фізичній поверхні Землі, а також складати за ними точні топографічні карти. Усе це змусило відмовитися від використання геоїда для геодезичних розрахунків. Перед наукою постало питання про заміну його такою геометричною фігурою, поверхня якої має постійну кривизну і може бути описана відомими математичними формулами. Оскільки форму геоїда великою мірою визначає обертання Землі з постійною швидкістю навколо її осі, то для вирішення практичних задач його поверхню замінено поверхнею еліпсоїда обертання. Центр еліпсоїда зіставляють з центром тяжіння Землі, площина екватора збігається з площиною екватора Землі, а мала його вісь – з полярною віссю обертання Землі PP' (рис. 1).

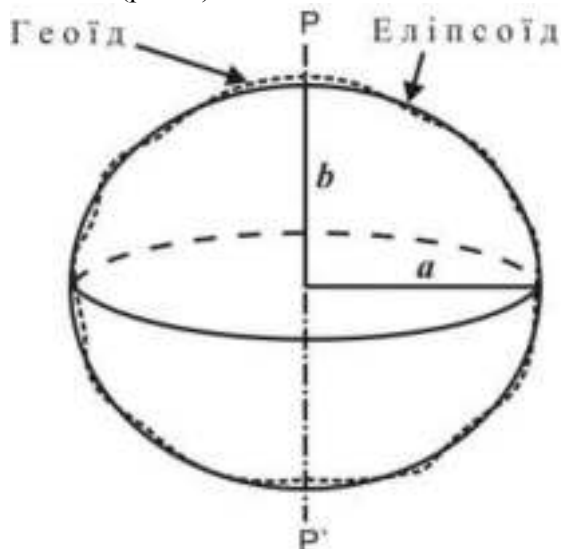


Рис. 1. Геоїд, земний еліпсоїд обертання та його велика a і мала b півосі

Під час вимірювань із космічних апаратів і виконання гравіметричних досліджень виявлено, що південний полюс на 44 м 70 см ближче до центру, ніж північний, а екватор Землі має форму еліпса, один із діаметрів якого більший від другого на 200 м. Крім того, південний полюс розташований на 25 м 80 см нижче від поверхні еліпсоїда, а північний полюс виступає на 18 м 90 см. На цій підставі форму планети іноді також ототожнюють із грушоподібним тілом, яке називають *аніоїдом*.

На поверхню еліпсоїда обертання уявно проєктують точки й елементи фізичної поверхні Землі, використовуючи прямовисні лінії та нормалі (лінії, перпендикулярні до поверхні еліпсоїда). На практиці згадана процедура зведена до розрахунків координат проєкцій точок місцевості (зокрема, пунктів опорної геодезичної мережі), які будуть трохи відрізнятися між собою, залежно від способу проєктування. Зумовлено це тим, що у точках земної поверхні напрямки прямовисних ліній і нормалей не збігаються, утворюючи певний кут, який називають *схиленням прямовисної лінії* (ξ) (рис. 2).

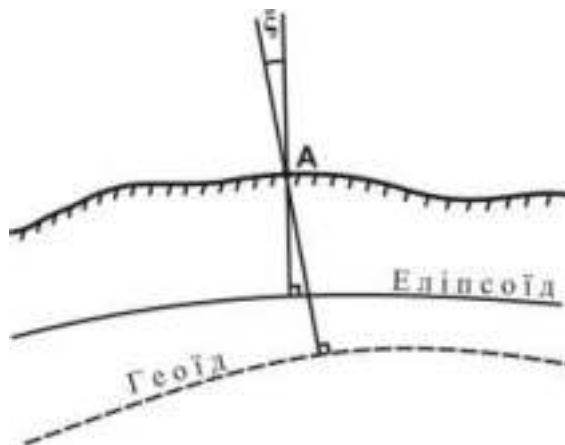


Рис. 2. Схилення прямовисної лінії

Для математичної обробки результатів геодезичних вимірювань на поверхні еліпсоїда треба знати його розміри. Сучасна наука для визначення форми та розмірів Землі використовує астрономо-геодезичний, геофізичний (гравіметричний) і космічний методи. Перші визначення розмірів планети зроблено астрономо-геодезичним методом ще у другій половині III ст. до н. е. видатним математиком і географом Ератосфеном. Суть цього методу полягає у вимірюванні лінійного значення одного градуса дуги меридіана та паралелі на різних широтах. Однак виконати безпосередні вимірювання протяжних відстаней із належною точністю на нерівній земній поверхні надто складно. Вирішена ця проблема була у XVII ст. голландським астрономом і математиком В. Снелліусом, який розробив метод триангуляції. За цим методом відстані між точками місцевості розраховують через тригонометричні функції за вимірними горизонтальними кутами й довжиною вихідної лінії. Триангуляційні роботи для визначення дуг меридіанів і паралелей виконували вчені різних країн (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри еліпсоїдів за різними дослідниками

Еліпсоїд	Рік визначення	Велика піввісь a , м	Мала піввісь, b , м	Стиснення	Країни, які використовують
Красовського	1940	6 378 245	6 356 863	1:298,3	Україна, Росія та ін.
Евереста	1830	6 377 299	6 356 098	1:300,8	Індія
Ейрі	1830	6 377 563	6 356 257	1:299,3	Великобританія
Бесселя	1841	6 377 397	6 356 079	1:299,2	Європа, Японія
Кларка	1866	6 378 206	6 356 584	1:295	Північна Америка
Кларка	1878	6 378 190	6 356 456	1:293,5	Північна Америка
Кларка	1880	6 378 249	6 356 515	1:293,5	Франція, Африка
Гайфорда	1910	6 378 388	6 356 912	1:297	США
Національний австралійський	1966	6 378 160	6 356 775	1:298,3	Австралія
Південноамериканський	1969	6 378 160	6 356 775	1:298,3	Південна Америка
NAD83	1983	6 378 137	6 356 752	1:298,3	Північна Америка

Ще у XVIII ст. було виявлено, що один градус дуги меридіана біля полюса довший, ніж біля екватора. Такі параметри властиві для еліпсоїда, стиснутого вздовж осі обертання. Це підтвердило гіпотезу І. Ньютона (1643–1727) про те, що Земля відповідно до законів гідродинаміки повинна мати форму еліпсоїда обертання, сплюсненого біля полюсів. Велике значення мали градусні вимірювання, виконані за участю Ж. Деламбра. За результатами цих вимірювань 1/1 000 000 частина чверті паризького меридіана була прийнята за одиницю довжини метричної системи мір – один метр. Суттєвим доповненням до градусних визначень став гравіметричний метод, який ґрунтується на вимірюванні потенціалу сили тяжіння та його розподілу на поверхні Землі. Гравіметричні дослідження започатковані у 1743 р. французьким ученим А. Клеро (1713–1765), який припускав, що поверхня Землі має вигляд сфероїда, складеного зі сферичних оболонок, густина яких збільшу-

ється до спільного центру. З початком освоєння космічного простору перед геодезією постали нові завдання та з'явилися нові можливості вивчення поверхні Землі. Виникла, зокрема, потреба у визначенні просторових координат космічних апаратів і виявленні відхилень їхніх реальних орбіт від розрахованих, які мали місце внаслідок нерівномірного розподілу мас у надрах Землі.

Розміри еліпсоїда визначають довжини його півосей a , b та значення полярного стиснення α :

$$\alpha = \frac{(a-b)}{a} \quad (1.1)$$

У нашій країні прийнято розміри еліпсоїда, обчислені в 1940 р. радянськими вченими-геодезистами Ф.М. Красовським та О.О. Изотовим. Цей еліпсоїд має такі параметри:

- екваторіальний радіус (велика піввісь) – $a = 6\,378\,245$ м;
- полярний радіус (мала піввісь) – $b = 6\,356\,863$ м;
- полярне стиснення – $\alpha = 1:298,3$;
- довжина меридіана – $40\,008\,550$ м;
- довжина екватора – $40\,075\,696$ м;
- площа – $510,3$ млн км²;
- об'єм – $1,083 \cdot 10^{12}$ км³.

Схилення прямої (кут ξ) для еліпсоїда Красовського змінюється у межах $3\text{--}4''$ (лише в окремих районах сягає $1'$), а максимальне відступання його поверхні від геоїда по висоті не перевищує $100\text{--}150$ метрів.

Для того, щоб земний еліпсоїд найкраще підходив до геоїда, його треба відповідно розташувати у тілі Землі або, інакше кажучи, зорієнтувати. *Еліпсоїд обертання з визначеними параметрами, орієнтований у тілі Землі таким чином, щоб відхилення його поверхні від геоїда для певної території було мінімальним, називають **референц-еліпсоїдом***. Орієнтування залежить від вибору точки земної поверхні, у якій нормаль зіставляють з прямою лінією. Для прив'язання референц-еліпсоїда до окремої території використовують **вихідні геодезичні дати** – координати і вихідний азимут у початковому пункті геодезичної мережі та висоту поверхні референц-еліпсоїда над поверхнею геоїда в цьому пункті. У табл. 2 наведено окремі вихідні геодезичні дати, які прийняті або раніше використовували деякі країни. Для наших територій у 1946 р. еліпсоїд Красовського прийнятий як референц-еліпсоїд для виконання геодезичних і картографічних робіт. Точка орієнтування – круглий зал Пулковської обсерваторії (Росія).

Координати вихідних пунктів референц-еліпсоїдів деяких країн

Країна	Еліпсоїд, вихідний пункт	Широта	Довгота
Україна, Росія	Красовського, 1940; Пулково (Росія)	+59°46'15,4''	+30°19'28,3''
Франція	Кларка 1880; Париж	+48°50'46,5''	+2°20'48,6''
Канада, США, Мексика	Кларка 1866; Мідс-Ренч (США, штат Канзас)	+39°13'26,7''	-98°32'30,5''
Великобританія	Ейрі; Гринвіч	+51°28'39,7''	0°00'00''
Китай	Бесселя; Нанкін	+32°03'26,4''	+118°46'56''
Індія, Пакистан	Евереста; Каліанпур	+24°07'11,3''	+77°39'17,6''
Алжир, Туніс	Кларка 1880; Карфаген	+36°51'60,5''	+10°19'20,6''

У другій половині ХХ ст. у зв'язку з розвитком космонавтики, розробкою планетарних навігаційних систем постала потреба у визначенні параметрів еліпсоїда, який би найкраще узгоджувався з поверхнею геоїда загалом. Щоб зорієнтувати у тілі Землі загальноземний еліпсоїд, необхідно виконати такі вимоги:

- центр еліпсоїда має збігатися з центром маси Землі;
- мала вісь еліпсоїда має збігатися з віссю обертання Землі;
- об'єм еліпсоїда має дорівнювати об'єму геоїда;
- сума квадратів відступання геоїда від загальноземного еліпсоїда має бути на всій Землі найменшою з усіх можливих ($\sum h^2 = \min$);
- сума квадратів відхилення прямовисних ліній має бути для всієї поверхні Землі найменшою з усіх можливих ($\sum U^2 = \min$).

Для орієнтування загальноземного еліпсоїда, на відміну від референц-еліпсоїда, відпадає потреба вводити вихідні геодезичні дати. Оскільки вимоги до загальноземного еліпсоїда на практиці дотримують із певними умовностями, то в геодезії та суміжних науках використовують кілька його модифікацій, вибираючи найточнішу для конкретних цілей. Параметри таких еліпсоїдів подібні, але не збігаються (табл. 3). Серед сучасних **загальноземних еліпсоїдів** розрізняють:

➤ GRS80 (Geodetic Reference System 1980) розроблений Міжнародною Асоціацією Геодезії та Геофізики (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG) і рекомендований для геодезичних робіт. Цей еліпсоїд точно зорієнтований для території

Європи на основі лазерної локації штучних супутників Землі й інтерферометрів із наддовгими базисами і, згідно з резолюцією спеціальної підкомісії EUREF (European Reference Frame), прийнятий як європейський референс-еліпсоїд під час міжнародного симпозиуму в Берні у 1992 р.;

- WGS84 (World Geodetic System 1984) використовують у системі супутникової навігації GPS;

- IERS96 (International Earth Rotation Service 1996) рекомендований Міжнародною службою обертання Землі;

- ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 года) використовують на території Росії для геодезичного забезпечення орбітальних польотів і в системі супутникової навігації ГЛОНАСС.

Таблиця 3

Параметри загальноземних еліпсоїдів

Назва	Рік	Велика піввісь	Мала піввісь	Країна/організація
WGS72	1972	6 378 135	6 356 750,5	США
GRS80	1979	6 378 137	6 356 752,3	IUGG
WGS84	1984	6 378 137	6 356 752,3	GPS
ПЗ-90	1990	6 378 136		Росія (ГЛОНАСС)
IERS96	1996	6 378 136,5	6 356 751,3	IERS
IERS2003	2003	6 378 136,6	6 356 751,9	IERS

Для вирішення багатьох практичних задач достатньо прийняти форму Землі за кулю, площа поверхні якої дорівнює площі еліпсоїда, а радіус – 6371,11 км.

2. СИСТЕМИ КООРДИНАТ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ТОЧОК ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Розташування об'єктів на земній поверхні в геодезії та топографії описують за допомогою координат. Координати – величини, які визначають положення точки на площині або у просторі щодо прийнятої системи координат. Кожна координатна система має свої початкові (вихідні) точки, площини або лінії відліку необхідних величин – початок координат і одиниці їх вимірювання.

Складна форма фізичної поверхні Землі унеможлиблює побудову на ній достатньо точної, математично обґрунтованої системи координат. Тому точки земної поверхні проєктують прямовисними лініями або нормальми на поверхню орієнтованого еліпсоїда, для якої задають відповідну систему координат (рис. 3).

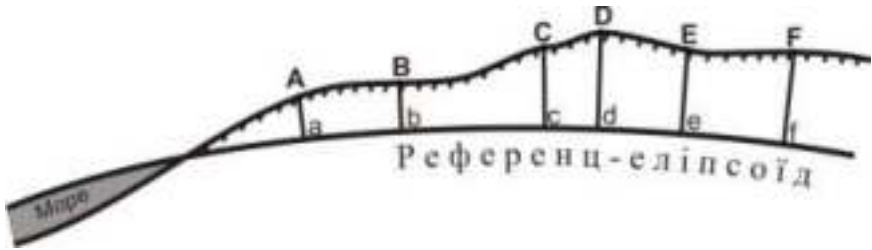


Рис. 3. Проекції точок місцевості на поверхню референц-еліпсоїда

Для визначення положення проєкцій точок на поверхні референц-еліпсоїда або загальноземного еліпсоїда в геодезії використовують системи географічних і прямокутних координат. Під час топографічних робіт на місцевості взаємне розташування точок зручно описувати за допомогою полярних координат. Щоб знати положення точки на фізичній поверхні Землі, треба також знайти висоти Aa, Bb, Cc, Dd, Ee, Ff, які відраховують від головної рівневої поверхні (рівня моря).

2.1. Система географічних координат

Цю систему координат використовують для визначення положення проєкцій точок Землі на поверхні еліпсоїда. Вихідними площинами у ній є площина початкового меридіана й екватора, а координатами – кутові величини: довгота і широта точки.

Поняття географічної довготи і широти запровадив ще у II ст. до н.е. давньогрецький астроном Гіпарх. Вони були обґрунтовані тим, що в той час заселена Земля вважалася видовженим островом, удвічі більшим з заходу на схід у довжину, ніж з півдня на північ у ширину. У середині XIX ст. перед світовою наукою постало завдання визначити єдиний для всіх початковий меридіан. З цією метою у вересні 1883 р. в Римі відбулася конференція Європейської комісії з вимірювань, яка розглянула питання про нульовий меридіан і про запровадження 24 годинних поясів (останню ідею висунув у 1878 р. канадський інженер А. Флемінг). На цій конференції майже одногосно прийняли рішення про затвердження початкового меридіана по довготі, на якій розташована неподалік Лондона Гринвіцька обсерваторія. Вибір не був випадковим. До цього часу вже багато десятиліть великий флот Британської імперії, а разом з ним і кораблі інших країн, орієнтувалися по меридіану саме цієї найдавнішої у Великобританії обсерваторії. Остаточне рішення було прийняте на спеціальній конференції у Вашингтоні в жовтні 1884 р. за участю не лише вчених багатьох країн, але й дипломатів із 25 держав.

На поверхні еліпсоїда й на топографічних картах координатну сітку утворюють меридіани та паралелі (рис. 4). **Меридіаном** називають лінію перетину еліпсоїда з площиною, яка проходить через дану точку і полярну вісь обертання Землі. **Паралель** – це лінія перетину еліпсоїда площиною, що проходить через дану точку та перпендикулярна земній осі. Площину, яка перпендикулярна осі обертання Землі та проходить через її центр, називають **площиною земного екватора**, а лінію перетину цієї площини із земною поверхнею (поверхнею еліпсоїда) – **екватором**.

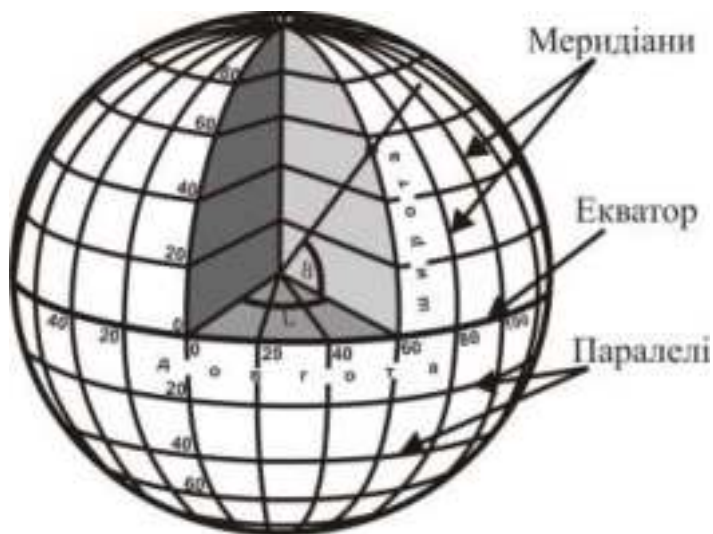


Рис. 4. Система географічних координат

Географічні координати – узагальнене поняття про астрономічні та геодезичні координати, коли схилення прямовисних ліній не враховують. Астрономічні координати визначають за спостереженнями небесних світил, використовуючи для проектування точок із фізичної поверхні на поверхню орієнтованого еліпсоїда прямовисні лінії. Геодезичні координати визначають із геодезичних вимірювань і подальших обчислень для поверхні референц-еліпсоїда; пов'язані вони з положенням нормалі у вибраній точці. Відомо, що прямовисна лінія та нормаль, проведені через одну і ту ж точку земної поверхні, не збігаються, а тому астрономічні та геодезичні координати трохи відрізняються. Для референц-еліпсоїда Красовського у межах території України це схилення в середньому дорівнює 2"–3". Унаслідок цього точки, нанесені на топографічну карту за астрономічними координатами,

будуть розташовані збоку від справжнього їх положення на карті приблизно на 70–100 м. У дрібномасштабній картографії цим неузгодженням нехтують і використовують широту й довготу як координати загальної системи географічних координат.

Астрономічні координати є компонентами орієнтування прямовисної лінії у вибраній точці земної поверхні щодо площини екватора і площини початкового астрономічного меридіана. *Площиною астрономічного меридіана є площина, яка проходить через прямовисну лінію в даній точці та паралельна осі обертання Землі.*

Астрономічна широта (φ) – кут, утворений прямовисною лінією у вибраній точці та площиною екватора.

Астрономічна довгота (λ) – двограний кут між площинами початкового астрономічного меридіана й астрономічного меридіана певної точки.

Геодезичні координати описують орієнтування нормалі у вибраній точці щодо площини екватора та початкового геодезичного меридіана (рис. 4). *Площину, яка проходить через нормаль до поверхні земного еліпсоїда у вибраній точці та його малу вісь, називають площиною геодезичного меридіана.*

Геодезична широта (B) – кут, утворений нормаллю до поверхні земного еліпсоїда у вибраній точці та площиною його екватора. Широту вимірюють по дузі меридіана від екватора ($B = 0$) до полюсів ($B = 90$), через що вона може бути північна (+) або південна (–).

Геодезична довгота (L) – двограний кут між площинами початкового геодезичного меридіана та геодезичного меридіана вибраної точки. Довготу відлічують по дузі екватора (паралелі) на схід (східна; «+») або на захід (західна; «–») від початкового меридіана, через що вона може змінювати значення від 0° (на початковому меридіані) до 180° .

На топографічних картах сітка меридіанів і паралелей відповідає геодезичній системі координат.

2.2. Системи прямокутних координат

Система географічних координат може бути розповсюджена як єдина координатна система на всю поверхню земного еліпсоїда. Але її використання пов'язане з певними труднощами, зокрема:

- взаємне розміщення точок визначають у кутових одиницях вимірювання, а відстані на місцевості вимірюють у лінійній мірі;
- значення одних і тих самих кутових одиниць відповідає різним лінійним значенням залежно від широти;

- використання географічних координат потребує складних і трудомістких, навіть для малих відстаней, розрахунків.

Зважаючи на це, для визначення положення точки у геодезії поряд з географічною використовують також систему прямокутних координат. Остання може бути поширена як на всю поверхню еліпсоїда, так і на окремі її ділянки.

2.2.1. Геоцентрична система прямокутних просторових координат

У цій системі початок координат розташований у центрі земного еліпсоїда і збігається з центром мас Землі. Вісь Z збігається з полярною віссю, а осі X , Y лежать у площині екватора. Вісь X лежить на лінії перетину площини початкового меридіана з площиною екватора, вісь Y – перпендикулярна до неї. Координатами довільної точки B у системі є значення X , Y , Z , які відповідають довжинам відповідних відрізків (рис. 5, а)

Цю систему використовують для визначення положення точки у глобальних системах координат (зокрема, WGS84) і позиції космічних апаратів у навколоремному просторі.

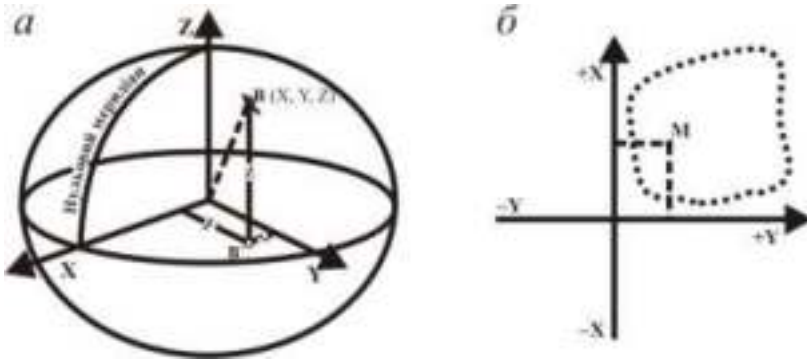


Рис. 5. Системи просторових (а) та локальних плоских (б) прямокутних координат

2.2.2. Локальна система плоских прямокутних координат

Таку систему координат застосовують на обмеженій за площею частині поверхні земного еліпсоїда, коли розміри ділянки виконання геодезичних робіт дають змогу не враховувати сферичність Землі. За вихідні напрямки приймають дві взаємно перпендикулярні прямі з початком відліку в точці їхнього перетину O . Пряма X – вісь абсцис, пряма Y – вісь ординат. Вісь абсцис X суміщають з напрямком меридіана, який проходить через початок координат, або з напрямком, який паралельний такому

меридіану. Вісь ординат проходить через точку O перпендикулярно до осі абсцис (рис. 5, б). За початок відліку координат приймають довільну точку на місцевості (система з умовним початком координат).

Координатами у цій системі є лінійні величини – абсциса і ордината, які відповідають найкоротшим відстаням до точки від вихідних осей. Так, положення точки M знаходять, вимірявши довжину перпендикулярів x_M і y_M у лінійних одиницях (переважно в метрах).

Координатні осі у точці перетину O ділять місцевість на чотири чверті, які нумерують за ходом годинникової стрілки та називають за сторонами світу. Абсциси точок, розташованих вище початку координат, вважають додатними, а нижче – від’ємними; ординати точок правіше початку координат мають додатні значення, лівіше – від’ємні. Назви чвертей і знаки координат наведено у табл. 4. Для зручності за початок координат вибирають таку точку, щоб стосовно неї вибрана ділянка місцевості й усі її об’єкти були розташовані в першій чверті.

Таблиця 4

Назви чвертей і знаки координат

Номер чверті	Назва чверті	Знаки координат	
		X	Y
I	Північно-східна (ПнС)	+	+
II	Південно-східна (ПдС)	-	+
III	Південно-західна (ПдЗ)	-	-
IV	Північно-західна (ПнЗ)	+	-

2.2.3. Зональна система плоских прямокутних координат Гаусса-Крюгера

Земну сферу (еліпсоїд) неможливо розгорнути на площину без розривів і згинів. Для зображення на площині великих ділянок земної поверхні використовують спеціальні картографічні проєкції, які дають змогу перенести точки поверхні Землі на площину за відповідними математичними законами. У геодезії найбільшого розповсюдження набули рівнокутні проєкції, оскільки для врахування спотворення необхідно вводити практично однакові поправки в довжину ліній у межах окремих ділянок. Для проведення топографо-геодезичних робіт на місцевості та складання топографічних карт масштабу 1:1 000 000 і крупніших в Україні прийнята рівнокутна поперечно-циліндрична проєкція еліпсоїда (сферичної поверхні) на площині, яку ще називають *проєкцією Гаусса-Крюгера*, та відповідна до неї система

прямокутних координат. К. Гаусс (1777-1855) – німецький учений, який у 30-ті роки XIX ст. розробив загальну теорію рівнокутних проєкцій. У 1912 р. Л. Крюгер (1857-1923) у роботі "Конформне зображення земного еліпсоїда на площині" запропонував формули для обчислень у цій проєкції. Зауважимо, що в наш час у цій проєкції використовують не формули Крюгера, а точніші формули, які вивели Ф.М. Красовський та О.О. Ізотов.

Розглянемо коротко геометричну суть проєкції Гаусса-Крюгера. Для її побудови поверхню земного еліпсоїда розбивають спочатку меридіанами на 60 зон по 6° довготи кожна (інколи приймають зони по 3° довготи). Нумерацію зон ведуть від нульового меридіана на схід. Границі зон проводять у системі географічних координат: 1-ша зона – $0-6^\circ$ східної довготи; 2-га – $6-12^\circ$ і т.д.

Розбитий на зони еліпсоїд вписують у циліндр, вісь якого лежить у площині екватора, а поверхня дотикається осьового меридіана однієї із зон (рис. 6). Усі точки та лінії цієї зони проєктують на бокову поверхню циліндра. Поступально-обертотвим рухом еліпсоїда виводять осьові меридіани кожної із зон у дотичне положення до поверхні циліндра та по чергово проєктують на неї решту зон незалежно одна від одної. Після цього циліндр розрізають уздовж довгої осі та розгортають його на площину. У такий спосіб буде виконана умова рівних кутів – кути на площині дорівнюють відповідним кутам на еліпсоїді.

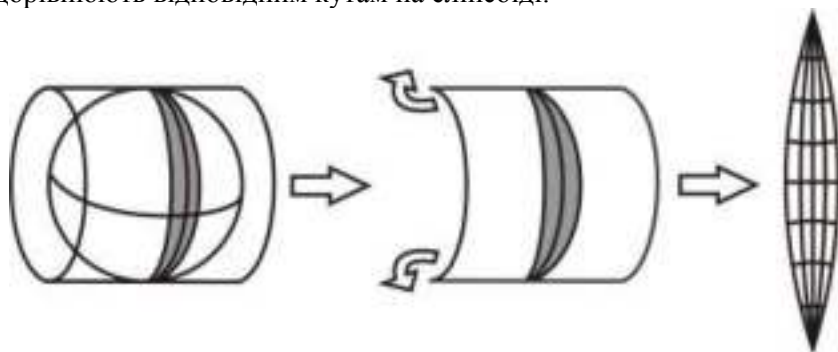


Рис. 6. Послідовність отримання проєкції 6-градусної зони Гаусса-Крюгера

Осьовий меридіан і екватор зони у проєкції Гаусса-Крюгера зображені у вигляді прямих ліній, решта меридіанів і паралелей – кривими. Меридіани проходять симетрично щодо осьового меридіана, а паралелі – щодо екватора. Осьовий меридіан, який є дотичним до поверхні проєктування, переданий без спотворень, і масштабний коефіцієнт (відношення фактичного масштабу

зображення до номінального) уздовж нього дорівнює одиниці (рис. 8, а). Довжини інших ліній і площі об'єктів будуть більшими, порівняно з їхніми горизонтальними проєкціями на рівневу поверхню. Площа зони загалом у проєкції також трохи збільшена. Спотворення довжин ліній збільшується з віддаленням від осьового меридіана, однак воно не перевищує межі точності графічних побудов для зазначених вище масштабів. Натомість ці похибки завеликі для складання карт і планів у масштабі 1:5 000 та крупніших, і тоді вже використовують 3-градусні зони. Середні меридіани таких зон збігаються з осьовими меридіанами 6-градусних зон або з їхніми крайніми меридіанами. Перші 3-градусна і 6-градусна зони мають один і той самий середній меридіан зі східною довготою у 3° . Довготу осьового меридіана обчислюють за формулою $L_c=3n$.

Для кожної 6-градусної зони будують самостійну систему прямокутних координат. Середній (осьовий) меридіан зони приймають за вісь абсцис, а проєкцію екватора – за вісь ординат; точка їхнього перетину – початок координат. Щоб визначити прямокутні координати точки М, треба опустити з неї перпендикуляри на вісь X та вісь Y (рис. 7). Значення перпендикулярів у масштабі картографічного зображення території відповідатиме координатам X та Y певної точки. У північній півкулі всі абсциси додатні. Щоб ординати точок теж були додатні, ординату початку координат приймають рівною 500 км, уявно зміщуючи вісь X на захід за межі зони. Число +500 вибрано з таких міркувань: довжина дуги в 1 градус на екваторі дорівнює приблизно 111 км, у 3 градусах – відповідно 333 км. Тому Y у межах зони може набувати значень від 333 до -333. Щоб ординати були додатні, ординаті осьового меридіана приписали ціле число кілометрів, більше 333. Таким числом є +500. Усі точки,

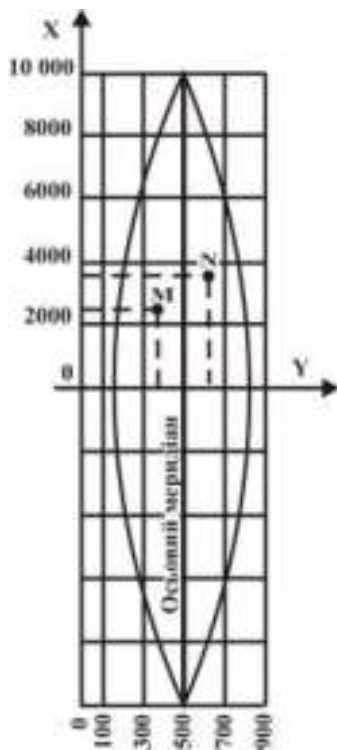


Рис. 7. Система прямокутних координат для проєкції 6-градусної зони

розташовані західніше осьового меридіана, мають ординату меншу +500 км, а східніше – більшу 500 км. Щоб було зрозуміло, в якій зоні розташована точка, до її ординати дописують номер зони. Наприклад, запис $Y = 7\ 381\ 252$ м означає, що точка розташована у сьомій зоні та віддалена від осьового меридіана на захід на 118 748 м. Координати, визначені у системі зі зміщеним початком відліку, називають *перетвореними (умовними, приведеними)*.

Координатну сітку в кожній проекції 6-градусної зони утворюють рівновіддалені взаємно перпендикулярні лінії, які проведені паралельно осям X та Y . Труднощі з використанням зональної системи координат виникають у тих випадках, коли топографо-геодезичні роботи проводять на периферійних ділянках, розташованих у двох сусідніх зонах. Координатні лінії таких зон розташовані під кутом одні до одних. Для уникнення ускладнень вводять смугу перекриття, у якій координати точок можна визначити у двох суміжних системах. Ширина смуги перекривання дорівнює $4'$, по $2'$ у кожній зоні.

Для визначення довготи меридіанів, які обмежують зону, та її осьового меридіана можна скористатися такими формулами:

а) для східної півкулі:

$$L_{\text{зах.}} = 6^\circ(n - 1); \quad L_{\text{сеп.}} = 6^\circ n - 3^\circ; \quad L_{\text{сх.}} = 6^\circ n, \quad (2.1)$$

б) для західної півкулі:

$$\begin{aligned} L_{\text{зах.}} &= 180^\circ - 6^\circ(n - 30 - 1) \\ L_{\text{сеп.}} &= 180^\circ - 6^\circ(n - 30) + 3^\circ \\ L_{\text{сх.}} &= 180^\circ - 6^\circ(n - 30), \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $L_{\text{зах.}}$ – довгота західного меридіана зони; $L_{\text{сеп.}}$ – довгота осьового меридіана; $L_{\text{сх.}}$ – довгота східного меридіана зони; n – номер зони.

2.2.4. Система координат UTM

У західних країнах для складання топографічних карт і розгортання системи прямокутних координат на великі території використовують також проекцію UTM (Universal Transverse Mercator – універсальна поперечно-циліндрична Меркатора), яку називають ще проекцією Гаусса-Боага. Це вдосконалений варіант проекції Гаусса-Крюгера, реалізований також на 6-градусних зонах. Кожна зона у цій проекції простягається від 80 паралелі на півдні до 84 паралелі на півночі. Асиметрія зон зумовлена тим, що 80 паралель проходить південніше Південної Америки, Африки й Австралії, але треба піднятися до 84 паралелі на півночі, щоб повністю охопити територію Гренландії. Тобто такі 6-градусні зони сукупно покривають майже всю поверхню планети, крім Північного Льодовитого океану та центральних районів Антарктиди.

Нумерацію зон починають від 180 меридіана у східному напрямку. Перша зона (UTM-1) на заході обмежена 180-м меридіаном, на сході – 174°, а центральний меридіан має західну довготу 177°.

У системі UTM для проектування зон використано поверхню циліндра, який є січним до поверхні еліпсоїда. Поверхня проектування (циліндра) проходить трохи нижче осьового меридіана зони й утворює дві лінії перетину з поверхнею еліпсоїда, які розташовані приблизно на 180 км по обидва боки від осьового меридіана (рис. 8, б). Уздовж останнього, де масштабний коефіцієнт дорівнює 0,9996, проекція кожної зони має невеликі спотворення, виражені зменшенням лінійних розмірів і площ об'єктів, порівняно з їхніми проекціями на рівневу поверхню. Далі по обидва боки від центрального меридіана проходять два меридіани з нульовими спотвореннями, а для периферії проекції зони властиве завищення довжин і площ. Загалом спотворення в UTM помітно менші, ніж у звичайній проекції Гаусса-Крюгера. За базову модель Землі в системі координат UTM у наш час використовують еліпсоїд WGS84.

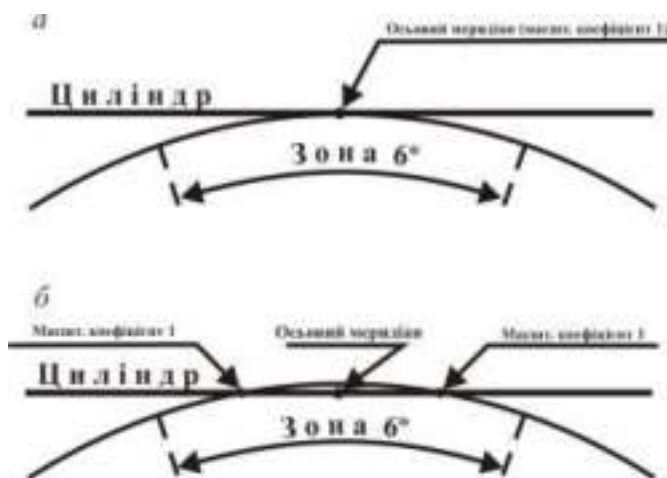


Рис. 8. Положення 6-градусної зони щодо поверхні проектування у проекції Гаусса-Крюгера (а) та у проекції UTM (б)

Положення проекції точки Землі на поверхню еліпсоїда визначають номер UTM-зони та пара координат – східна і північна (easting і northing). Кожна зона має два комплекти декартових координат для північної та південної частин окремо (рис. 9). У північній частині зони початок координат розташований на екваторі на 500 км західніше від точки перетину екватора й

осьового меридіана. Північна координата як найкоротша відстань від екватора до точки може набувати значень від нуля на екваторі до 9 328 000 м на 84-й паралелі. Для південної частини зони початок координат зміщено також на 500 км на захід (false easting) та на 10 000 км на південь від екватора (false northing). Завдяки такому положенню початків відліку в системі UTM, як і в системі Гаусса-Крюгера, будь-яка точка у межах 6-градусної зони завжди матиме додатні східну та північну координати.

Однак використання двох комплектів координат зумовлює певну плутанину, пов'язану з тим, що і в північній, і в південній підзонах є точки з однаковими координатами. Для того, щоб однозначно вказати положення точки, треба до номера зони дописати позначення півкулі – північної (N) або південної (S). Тоді прямокутні координати точки у системі UTM матимуть, наприклад, такий формат запису: 17N 630 084 9 582 438. Це означає, що точка розташована у північній частині 17-ї зони, східна координата її дорівнює 630 084 м, а північна (зміщення на північ від екватора) – 9 582 438 м.

Для уточнення положення точки використовують також інший спосіб, запропонований у 1951 р. військовими армії США та згодом запроваджений у НАТО. Кожну зону вони розділяють на 20 широтних смуг по 8° кожна (рис. 10). Позначають смуги літерами англійського алфавіту, починаючи від 80-ї паралелі південної широти, яка є південною межею смуги С, до 84-ї паралелі північної широти, яка обмежує з півночі смугу Х (широту останньої збільшено на 4°, щоб повністю охопити північ Гренландії). Із позначення смуг виключено літери І та О через їхню подібність до цифр 1 та 0. Введено також смуги А, В і Y, Z, які охоплюють західні та східні частини антарктичних і арктичних регіонів відповідно. Крайні меридіани 6-градусних зон і

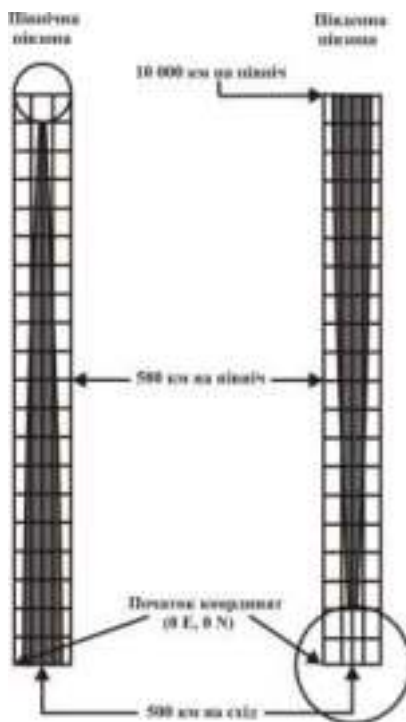


Рис. 9. Бінарна система координат в UTM

паралелі, які розділяють широтні смуги, утворюють зональну сітку на поверхні еліпсоїда або на його картографічній проекції.

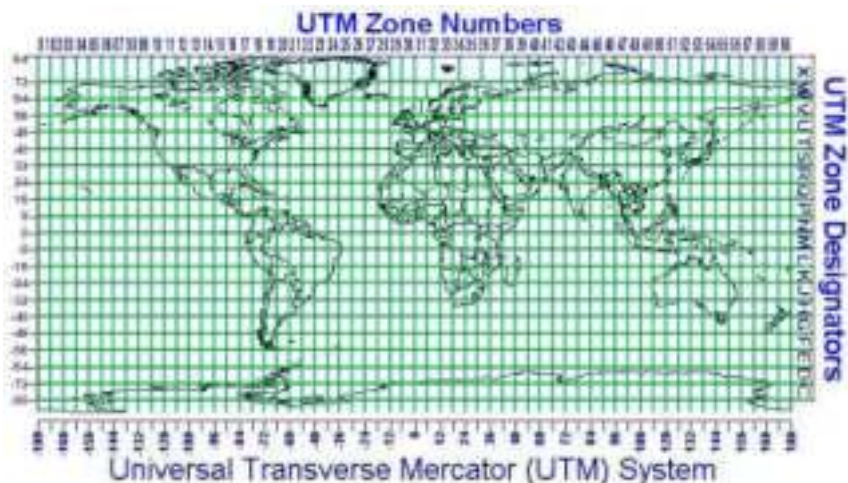


Рис. 10. Сітка широтних смуг і 6-градусних зон UTM

Вказівку на географічне положення точки уточнюють, вводячи у запис координат номер зони та літерне позначення широтної смуги, наприклад: 17T 630 084 4 833 438. Однак така форма запису координат приховує неоднозначність у разі, якщо точка розташована у широтних смугах S або N, літерні позначення яких такі ж, як і символи південної та північної півкулі. Тому необхідно попередньо домовитися про зміст позначень або давати, наприклад, повні назви півкулі: Нижче у табл. 5 наведено для порівняння головні відомості про системи прямокутних координат Гаусса-Крюгера та UTM.

Таблиця 5

Вихідні параметри систем прямокутних координат

Вихідні параметри	Гаусса-Крюгера	UTM
Ширина зони	6°	6°
Масштабний коефіцієнт на осьовому меридіані	1	0,9996
Початковий меридіан лічби зон	0	180
Уявне східне зміщення	500 км	500 км
Уявне зміщення на північ (для північної півкулі)	0	0
Уявне зміщення на північ (для південної півкулі)	10 000	10 000
Межі застосування		80° S – 84° N

2.3. Полярна система координат

Полярні координати – це система координат на площині, кулі або поверхні еліпсоїда, що складається з точки O , яку називають полюсом, початку координат і полярної осі. За початок відліку (полнос) приймають довільну точку на місцевості, тому такі координати називають *топоцентричними*. За полярну вісь обирають довільний напрямком або суміщають із напрямком меридіана, що проходить через полюс O (рис. 11, *a*). Положення будь-якої точки M визначається радіус-вектором r , за який приймають пряму на площині, що з'єднує шукану точку з полюсом, та полярним кутом β . У полярній системі координат полярний кут вимірюють від полярної осі за ходом годинникової стрілки до радіус-вектора.

Біполярні координати – лінійні або кутові величини, що визначають положення точки M на площині, кулі, еліпсоїді щодо вихідних точок P_1 та P_2 (рис. 11, *б*). Цими величинами можуть бути відстані d_1 та d_2 від точки M до точок P_1 та P_2 або кути β_1 та β_2 , утворені напрямками P_1M і P_2M з прямою P_1P_2 .

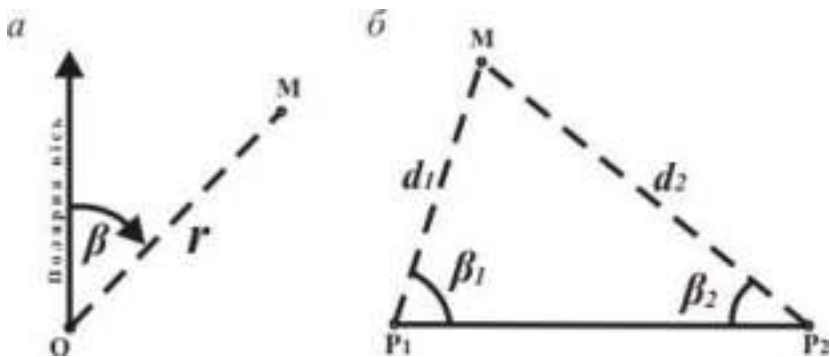


Рис. 11. Полярна (*a*) та біполярна (*б*) системи координат

2.4. Зв'язок плоскої прямокутної та полярної систем координат

Простота полярної системи координат і можливість побудови щодо довільної точки місцевості, яку приймають за полюс, обумовили її широке використання в топографії. Щоби зв'язати в одне ціле полярні системи координат окремих точок місцевості, слід перейти до визначення положення останніх у прямокутній системі координат, яка може бути розповсюджена на значно більшу за площею територію. Зв'язок між двома системами визначають шляхом розв'язку прямої та зворотної геодезичних задач. Пряма геодезична задача полягає у визначенні координат кінцевої точки

лінії за довжиною її горизонтального прокладення, кутом напрямку та координатами початкової точки. Так, якщо прийняти точку А за полюс полярної системи координат, а пряму АС – за полярну вісь, паралельну осі ОХ, то полярними координатами точки В будуть d і β (рис. 12). Треба знайти прямокутні координати цієї точки в системі ХОУ. Із рисунка видно, що X_B відрізняється від X_A на величину $(X_B - X_A) = \Delta X$, а Y_B від Y_A – на величину $(Y_B - Y_A) = \Delta Y$. Різниці координат кінцевої В та початкової А точок лінії АВ ΔX і ΔY називають *приростами координат*.

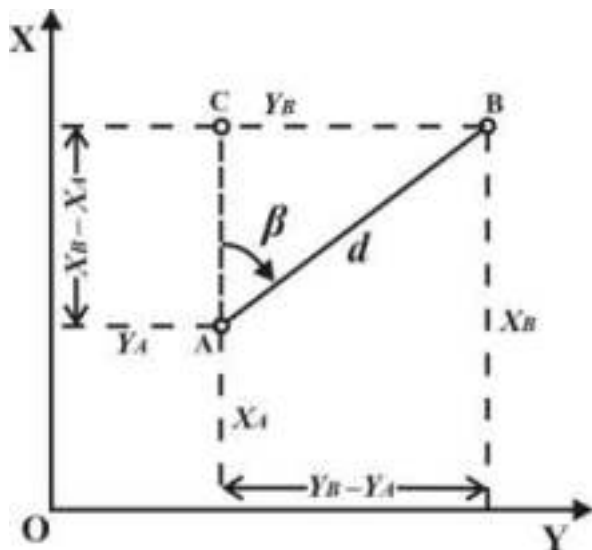


Рис. 12. Геометричний зв'язок полярних і прямокутних координат

Прирости координат лінії є ортогональними проєкціями горизонтального прокладення цієї лінії на осі координат, а координати X_B і Y_B можна обчислити за формулами:

$$X_B = X_A + \Delta X_{AB}; \quad Y_B = Y_A + \Delta Y_{AB}. \quad (2.3)$$

Значення приростів координат знаходять з прямокутного трикутника АСВ за відомими d і β , оскільки прирости ΔX і ΔY є катетами цього прямокутного трикутника:

$$\Delta X_{AB} = d \cos \beta; \quad \Delta Y_{AB} = d \sin \beta. \quad (2.4)$$

Прирости координат мають знаки. Знак приросту залежить від знака косинуса і синуса кута напрямку або від назви чверті прямокутної системи координат (табл. 6).

Підставивши значення приростів ΔX_{AB} і ΔY_{AB} у рівність (2.3), отримаємо формули для розв'язку прямої геодезичної задачі:

$$X_B = X_A + d \cos \beta; \quad Y_B = Y_A + d \sin \beta. \quad (2.5)$$

Зв'язок між величиною кута напрямку та знаком приросту координат

Кут напрямку	Чверть	Знаки приростів координат	
		ΔX	ΔY
0–90	I–ПнСх	+	+
90–180	II–ПдСх	–	+
180–270	III–ПдЗх	–	–
270–360	IV–ПнЗх	+	–

Зворотна геодезична задача полягає у знаходженні довжини горизонтального прокладення d і кута напрямку β лінії АВ за відомими координатами її початкової точки А (X_A, Y_A) і кінцевої точки В (X_B, Y_B). Кут напрямку обчислюють за катетами прямокутного трикутника:

$$\operatorname{tg} \beta = (Y_B - Y_A) / (X_B - X_A) = \Delta Y_{AB} / \Delta X_{AB}. \quad (2.6)$$

Горизонтальне прокладення d , згідно з виразами (2.4), можна визначити за двома формулами:

$$\begin{aligned} d &= \Delta X_{AB} / \cos \beta = (X_B - X_A) / \cos \beta; \\ d &= \Delta Y_{AB} / \sin \beta = (Y_B - Y_A) / \sin \beta. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Зворотну задачу можна вирішити і в іншій послідовності: спочатку знайти горизонтальне прокладення d за теоремою Піфагора, а потім обчислити кут β за формулами:

$$\sin \beta = (Y_B - Y_A) / d; \quad \cos \beta = (X_B - X_A) / d. \quad (2.8)$$

2.5. Висота точок

Вище було розглянуто лише дві координати (широту і довготу; X і Y), що недостатньо для визначення положення точок на фізичній поверхні Землі. Потрібна третя складова – висота точки.

Висота точки (H) – це відстань по прямовисному напрямку від даної точки (або рівневої поверхні, що через неї проходить) до рівневої поверхні, прийнятої за початок відліку висот. Вихідною для відліку висот може бути поверхня геоїда (**ортOMETРИЧНА висота**) або поверхня земного еліпсоїда (**геодезична висота**). Числове значення висоти точки називають **відміткою (відміткою висоти)**.

Абсолютна висота – висота, виміряна від головної рівневої поверхні (рівня Світового океану в стані спокою та рівноваги); **умовна** – визначена щодо довільно вибраної рівневої поверхні. Різницю висот двох точок (або відстань по прямовисному напрямку між рівневими поверхнями, що проходять через будь-які дві точки) називають **відносною висотою**, або **перевищенням h** цих точок. Перевищення може бути додатним і від'ємним.

У країнах СНД за головну рівневу поверхню приймають рівень Балтійського моря у Фінській затоці, за яким ведуть спостереження за допомогою мореографа-реєстратора. Він встановлений у спеціальному павільйоні біля мосту через Обвідний канал. У 1840 р. на цьому мосту прямовисно закріпили футшток-рейку з поділками так, щоб її нижній кінець був занурений у воду. Середній рівень моря відповідає нулю Крондштадтського футштока, який прийнято за вихідний пункт нівелірних мереж.

3. КУТИ НАПРЯМКІВ І ЗВ'ЯЗОК МІЖ НИМИ

Під час орієнтування на місцевості або роботи з топографічною картою часто виникає потреба визначати просторове положення не лише окремих точок, але й ліній напрямків. Напрямок зазвичай відповідає траєкторії прямолінійного переміщення з однієї точки в іншу або візуванню погляду чи зорової труби приладу в бік певної точки. Він може бути прямий і зворотний. Якщо розглядати напрямок від якої-небудь початкової точки до кінцевої – то це буде прямий напрямок, а якщо від кінцевої до початкової – то зворотний.

3.1. Кути напрямків

Напрямок будь-якої лінії на місцевості або карті можна визначити щодо іншого напрямку, знайшовши кут між вихідним (початковим) напрямком і заданою лінією. У зв'язку з орієнтуванням за сторонами світу за вихідні напрямки прийнято: *істинний (географічний) меридіан, осьовий (середній) меридіан зони та магнітний меридіан*, який збігається з напрямком вільно підвішеної магнітної стрілки. Залежно від прийнятого вихідного напрямку розрізняють *азимут географічний (істинний), азимут магнітний і дирекційний кут*.

Азимутом називають двогранний кут, виміряний за ходом годинникової стрілки від північного напрямку площини меридіана точки спостереження до вертикальної площини, що проходить через цю точку і заданий напрямок. Азимути можуть набувати значень від 0 до 360°. Азимут, виміряний від географічного меридіана, називають *географічним*, або *істинним* (A); а від магнітного меридіана – *магнітним* (A_M). Розрізнення істинного та магнітного азимутів пов'язане з різним положенням географічного та магнітного полюсів на земному еліпсоїді. Відповідно, між географічним меридіаном і напрямком магнітної стрілки (магнітним меридіаном) виникає горизонтальний кут δ , який називають *схиленням магнітної стрілки* (рис. 13).

За положенням силових ліній магнітне поле Землі подібне до поля так званого диполя – елементарного магніту з нескінченно близькими полюсами, які розміщені у центрі земного еліпсоїда. Вісь диполя нахилена до осі обертання Землі приблизно на 11° . Магнітні силові лінії (магнітні меридіани) сходяться в магнітних полюсах Землі, які не збігаються з географічними, розміщені у глибині планети і з часом змінюють своє положення.

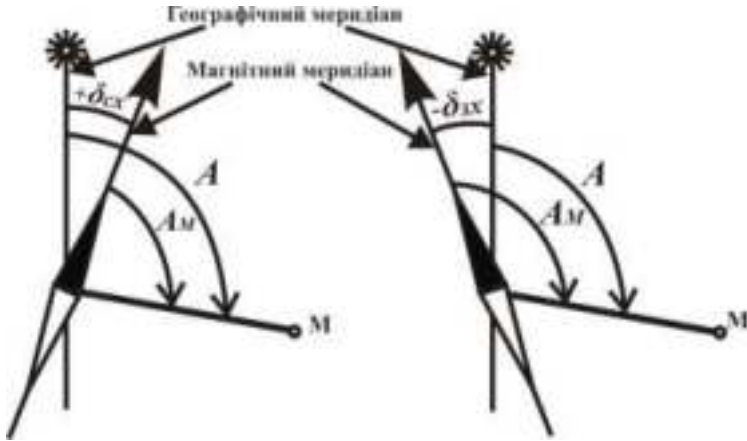


Рис. 13. Зв'язок між географічним і магнітним азимутами

Упродовж геологічної історії Землі поряд зі значним переміщенням магнітних полюсів неодноразово змінювалася їхня полярність. У сучасну епоху в північній півкулі розташований південний (негативний) магнітний полюс, а у південній – північний (позитивний). Магнітні силові лінії виходять із позитивного і входять у негативний полюс. Незважаючи на це, магнітні полюси прийнято називати у відповідності з півкулею, у якій кожен із них розташований.

В одній і тій самій точці на поверхні Землі з часом відбувається зміна схилення магнітної стрілки. Розрізняють добові, річні та вікові зміни схилення. В Україні річна зміна схилення у середньому близька до 6° , добова не перевищує $15'$. Схилення може бути східним (додатним), якщо північний кінець магнітної стрілки відхиляється на схід від істинного меридіана, або західним (від'ємним), якщо стрілка відхиляється на захід (рис. 13). Схилення змінюється також під впливом магнітних бур. Над ділянками земної кори, де зосереджені мінерали заліза із залишковою намагніченістю, скористатися компасом узагалі неможливо. Наприклад, напруженість магнітного поля відомої Курської магнітної аномалії

у 5 разів перевищує середнє, а схилєння змїнюється на 130–170° на вїддалї 1–2 км. Тому на таких територїях, а також у мїсцях скупчення залїза, поруч із полотном залїзниці, електромережами не можна проводити роботи з магнїтною стрїлкою компаса. У загальному випадку за вїдсутностї аномалїї напрямок магнїтного меридїана за допомогою магнїтної стрїлки можна визначити з точнїстю до 15'. На топографїчних картах пїд пївденною рамкою зазначають середнє значєння магнїтного схилєння у даному районї та значєння його змїни за рїк.

Слїд розрїзняти також нахилєння магнїтної стрїлки, тобто кут її нахилу до площини горизонту. У пївнїчній пївкулі опущений вниз пївнїчний кїнець магнїтної стрїлки, а у пївденнїй – пївденний кїнець. Лїнія, на якїй нахилєння дорївнює нулю, називають магнїтним екватором. Він перетинає географїчний екватор приблизно на 169° схїдної довготи і 23° захїдної довготи. Точки, у яких нахилєння дорївнює 90°, називають магнїтними полюсами.

Істинний і магнїтний азимути пов'язанї залежнїстю:

$$A = A_M \pm \delta \text{ та } A_M = A - (\pm \delta) \quad (3.1)$$

з урахуванням знака магнїтного схилєння.

Азимути можуть бути прямї та зворотнї. Для однїєї і тїєї ж довгї лїнїї на територїї 6-градусної зони в рїзних її точках вони вїдрїзняються мїж собою на кут $180 + \gamma$, а в однїй і тїй самїй точцї – на 180° (рис. 14). Кут γ виникає внаслїдок того, що географїчні меридїани є кривими непаралельними лїнїями, якї сходяться до полюсїв.

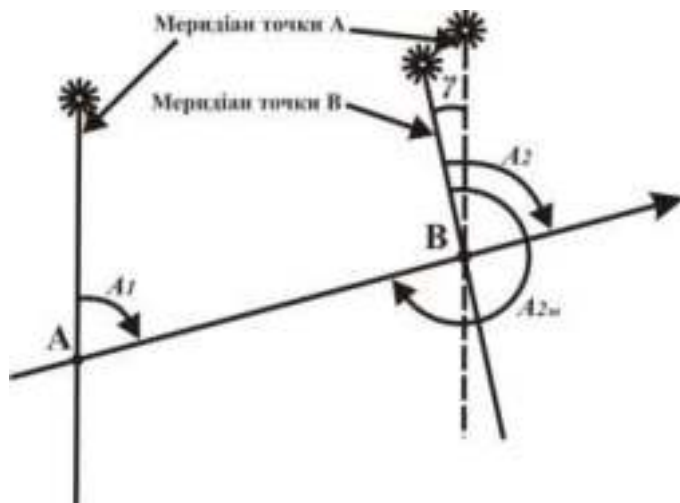


Рис. 14. Змїна азимуту напрямку на величину зближення меридїанїв

Називають його *зближенням меридіанів*. Доведено, що зближення меридіанів двох точок, які мають однакову широту, дорівнює різниці довготи цих точок, помноженої на синус широти:

$$\gamma = (L_1 - L_2) \sin B. \quad (3.2)$$

У топографії розрізняють *зближення географічних меридіанів* і *гаусівське зближення*. Гаусівське зближення виникає тому, що у межах 6-градусної зони лінія координатної сітки, паралельна осьовому меридіану зони, та напрямок географічного меридіана, які проведені через одну і ту ж точку, не збігаються. Горизонтальний кут у заданій точці між її географічним меридіаном (вертикальний відрізок внутрішньої рамки топографічної карти) і лінією, паралельною осі абсцис або осьовому меридіану зони, розглядають як гаусівське зближення меридіанів і визначають за формулою:

$$\gamma_G = (L_{oc} - L_m) \sin B. \quad (3.3)$$

Воно змінюється від 0 на екваторі, де $B=0^\circ$, до 1 на полюсі, де $B = 90^\circ$, і наближається до 3° біля полюсів на краю зони. Зближення меридіанів має додатне значення для усіх точок зони, розміщених на схід від осьового меридіана (східне зближення) та від'ємне для усіх точок, розміщених на захід (західне зближення).

Використовувати географічні азимути не завжди зручно, тому що для однієї і тієї ж лінії у різних її точках вони різні. Так, при переході у наших широтах із заходу на схід (або навпаки) на 1 км значення істинного азимута змінюється приблизно на $0,8'$. Тому для практичних цілей зручніше на площині орієнтувати лінії у межах кожної зони щодо її осьового меридіана. *Горизонтальний кут, який відраховують за ходом годинникової стрілки від північного напрямку осьового меридіана або лінії, паралельної йому, до лінії заданого напрямку називають дирекційним кутом (α)*. Дирекційні кути, виміряні в будь-якій точці заданого напрямку, зберігають (на відміну від азимутів) своє значення, що є великою перевагою під час геодезичних розрахунків. Розрізняють прями та зворотні дирекційні кути. Залежність між істинним азимутом і дирекційним кутом має вигляд:

$$A = \alpha + (\pm\gamma_r). \quad (3.4)$$

У точках, розташованих на осьовому меридіані зони, де $\gamma = 0$, азимут і дирекційний кут лінії напрямку мають однакові значення.

Щоб перейти від величини магнітного азимута до дирекційного кута, слід ввести поправку на схилення магнітної стрілки та зближення меридіанів, яка є їх алгебраїчною різницею і називається *поправкою напрямку*:

$$ПН = (\pm\delta) - (\pm\gamma); A_m = \alpha - (\pmПН). \quad (3.5)$$

Іноді орієнтування ліній зручніше виражати гострими кутами – румбами. **Румбом** називають гострий горизонтальний кут, виміряний від найближчого (північного або південного) напрямку меридіана до лінії заданого напрямку. За величиною румби можуть змінюватися від 0 до 90°. Назва румба залежить від вихідного напрямку: істинний, магнітний і дирекційний (осьовий). Румби супроводжуються обов’язково назвою чверті, в якій проходить лінія, оскільки градусне значення румба може бути однаковим.

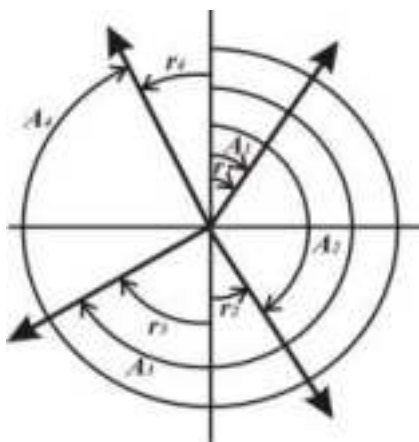


Рис. 15. Зв’язок азимута з румбом

Зв’язок між румбами й азимутом (або дирекційним кутом) показано на рис. 15 і в поданій нижче (табл. 7).

Таблиця 7

Зв’язок між азимутом і румбом

Чверть	Значення азимута	Зв’язок між азимутом і румбом	
I–ПнСх	0–90	$r_1 = A_1$	$A_1 = r_1$
II–ПдСх	90–180	$r_2 = 180 - A_2$	$A_2 = 180 - r_2$
III–ПдЗх	180–270	$r_3 = A_3 - 180$	$A_3 = 180 + r_3$
IV–ПнЗх	270–360	$r_4 = 360 - A_4$	$A_4 = 360 - r_4$

3.2. Визначення кутів напрямків на топографічних картах

На топографічних картах вимірюють, як правило, дирекційний кут заданого напрямку. Зробити це найпростіше, тому що вертикальні лінії кілометрової сітки з відповідним інтервалом проходять через усю карту. Можна виміряти також азимут дійсний, але для цього треба продовжити лінію напрямку до перетину зі східним чи західним меридіаном карти або перенести котрийсь меридіан (побудувати лінію, паралельну йому) в задану точку лінії напрямку. Під час вимірювання кута напрямку транспортир ставлять у точку перетину вихідного меридіана з лінією напрямку. Точка перетину ділить меридіан на два кінці – північний і південний (рис. 16). Так само лінія напрямку має два діаметрально протилежні кінці, але тільки один із них відповідає заданому напрямку. Кут напрямку (дирекційний або азимут) вимірюють

завжди від північного кінця меридіана точки стояння за ходом годинникової стрілки до відповідного кінця лінії напрямку.

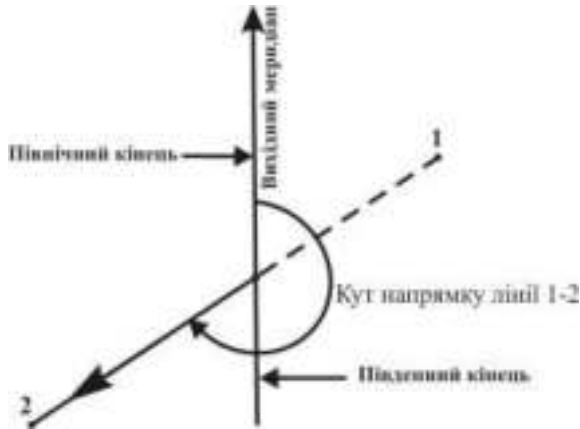


Рис. 16. Схема вимірювання кута напрямку

Магнітний азимут виміряти на карті неможливо, оскільки не показані магнітні меридіани. Але цей кут напрямку важливий з огляду на те, що його використовують під час орієнтування на місцевості за допомогою компаса. Тому азимути заданого напрямку розраховують, вимірявши на карті лише дирекційний кут. Для цього треба знати зв'язок між орієнтувальними кутами, що залежить від взаємного розміщення меридіанів і значень магнітного схилення та зближення меридіанів для даної місцевості. Ці відомості подані у вигляді схеми та пояснювального тексту зліва під південною рамкою кожного аркуша топографічної карти. Схему розташування вихідних напрямків можна уявно або графічно помістити у будь-яку точку лінії напрямку (рис. 17).

Розглянемо приклад визначення кутів заданого напрямку, використовуючи рисунок і наведені вище співвідношення. Найперше треба виміряти дирекційний кут α . Згідно з рисунком, напрямок лежить у другій, південно-східній, чверті, тому дирекційний кут може набувати значення від 90 до 180°. Для прикладу візьмемо $\alpha = 130^\circ$, зближення меридіанів (γ) західне 2° , магнітне схилення (σ) східне 3° та схему розташування вихідних напрямків, що показана на рис. 17. Тоді:

$$A_D = \alpha + (-\gamma) = 130^\circ - 2^\circ = 128^\circ;$$

$$ПН = (+\sigma) - (-\gamma) = 3^\circ - (-2^\circ) = 5^\circ;$$

$$A_M = \alpha - ПН = 130^\circ - 5^\circ = 125^\circ$$

$$\text{або } A_M = A_D - (+\sigma) = 128^\circ - 3^\circ = 125^\circ.$$

Румб дирекційного кута r :
 $ПдСх r = 180^\circ - 130^\circ = 50^\circ$.

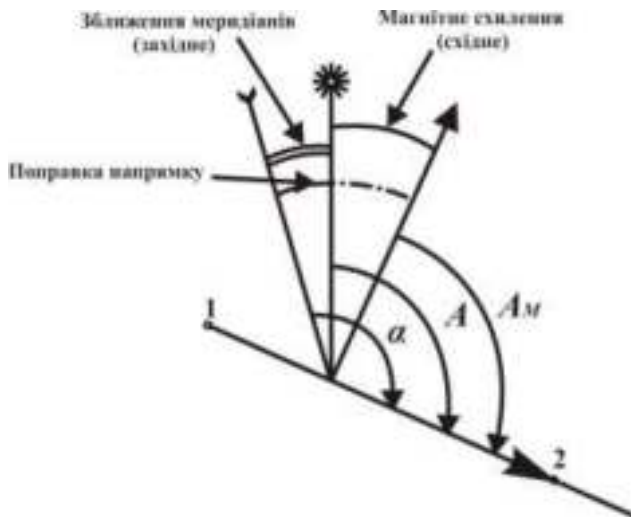


Рис. 17. Зв'язок між кутами напрямків

Розраховуючи значення магнітного азимута, треба взяти до уваги також рік вимірювання магнітного схилення для даної території та його річну зміну, які наведені у текстовому поясненні.

3.3. Зв'язок між дирекційними кутами і кутами повороту ліній напрямків

Під час геодезичних розрахунків часто доводиться визначати дирекційний кут наступного напрямку за відомим значенням дирекційного кута початкового напрямку. Візьмемо три точки 1, 2, 3, з'єднані послідовно лініями (рис. 18). Ці лінії у точці 2 утворюють два кути повороту, один із яких розташований справа по ходу (або просто правий кут β_n), а другий – зліва (β_l). Продовживши напрямок 1–2 за точку 2, покажемо у точці 2 значення дирекційного кута лінії 1–2. Кут, утворений продовженням напрямку і напрямком 2–3, позначимо через ω . Його значення, згідно з рисунком, буде $\omega = 180 - \beta_n$. З рисунка також видно, що $\alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} + \omega$. Підставивши значення ω , отримаємо:

$$\alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} + 180 - \beta_n \quad \text{або} \quad \alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} - 180 + \beta_l. \quad (3.6)$$

Узагальнюючи наведені формули для розрахунку дирекційних кутів інших ланок неперервного ходу, можна їх сформулювати так: щоб визначити дирекційний кут наступної ланки, треба до дирекційного кута попередньої ланки додати 180° і відняти правий за ходом кут повороту або від дирекційного кута

попередньої ланки відняти 180° і додати лівий кут повороту ходу. Під час розрахунків за необхідності додають або віднімають 360° , пам'ятаючи про те, що кінцеве значення дирекційного кута не може бути від'ємним або більшим 360° .

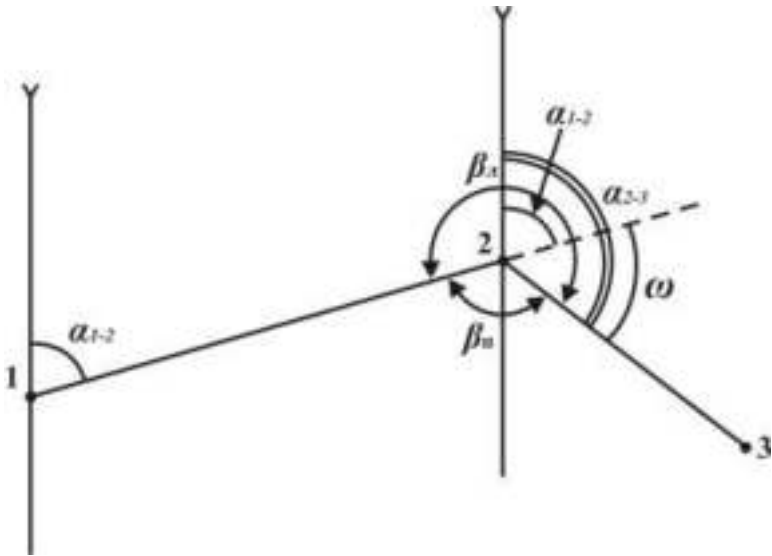


Рис. 18. Зміна дирекційного кута у разі повороту лінії напрямку

4. РОЗГРАФЛЕННЯ ТА НОМЕНКЛАТУРА ТОПОГРАФІЧНИХ КАРТ І ПЛАНІВ

Топографічні карти складають на великі території, і тому представлені вони багатьма аркушами. Рамками цих аркушів є відрізки меридіанів і паралелей, які утворюють трапецію, оскільки меридіани сходяться до полюсів. Розміри аркуша по довготі й широті залежать від масштабу карти: чим більший масштаб, тим меншу площу можна відобразити на стандартному аркуші паперу. У системі топографо-геодезичної служби України прийнято такі масштаби топографічних карт і планів: 1:1 000 000, 1:500 000, 1:300 000, 1:200 000, 1:100 000, 1:50 000, 1:25 000, 1:10 000, 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500.

Під час складання карт різних масштабів для окремо взятої частини земної поверхні картографи стикаються з проблемою, яка полягає в різкій зміні розмірів аркушів карт. Якщо, наприклад, для певної території, зображеної на аркуші карти мільйонного масштабу, побудувати карту в п'ятсоттисячному масштабі, то лінійні розміри такого аркуша збільшаться удвічі, а площа – в 4

рази. Для карт двохсоттисячного масштабу лінійні розміри збільшуються відповідно в 5 разів, а площа – в 25 разів. Щоб уникнути цього, запроваджено спеціальну систему поділу топографічних карт на окремі аркуші, яку називають **розграфленням**. Суть розграфлення полягає в тому, що на картах різних масштабів відображають певні частини вибраної території, не змінюючи при цьому лінійних розмірів їхніх аркушів. Для розрізнення окремих аркушів карт використовують спеціальну систему умовних позначень – **номенклатуру**. Головними принципами складання номенклатури топографічних карт є:

1) пряма залежність від географічного положення території, яка зображена на аркуші (дає змогу швидко добирати аркуші карти на будь-яку ділянку земної поверхні);

2) залежність від масштабу зображення (дає змогу легко переходити від карт одного масштабу до іншого).

Звідси випливає, що позначення тих аркушів карт, на яких зображена одна і та ж територія, повинні містити одночасно вказівки на географічне положення та масштаб.

В Україні та багатьох інших країнах за основу для розграфлення і складання номенклатури топографічних карт різних масштабів прийнято розграфлення й номенклатуру карти масштабу 1:1 000 000, які були затверджені на Міжнародному географічному конгресі у 1921 р. Щоб отримати аркуші карти мільйонного масштабу, всю поверхню Землі поділено на сферичні трапеції з розмірами сторін по широті $\Delta\varphi = 4^\circ$ і по довготі $\Delta\lambda = 6^\circ$ (рис. 19). Тобто аркуші такої карти обмежені двома меридіанами з різницею довготи в 6° і збігаються з межами координатної зони у проекції Гаусса-Крюгера. *Чотириградусні смужки карт мільйонного масштабу, розташовані між двома сусідніми паралелями з різницею широти в 4° , називають **поясами (рядами)***. Їх позначають великими літерами латинського алфавіту (А, В, С,.....V), починаючи від екватора до Північного полюса у північній півкулі або до Південного полюса у південній. Пояс А обмежений екватором і паралеллю у 4° широти, пояс В – паралелями у 4° і 8° широти, пояс С – 8° і 12° і т.д. Пояс, позначений літерою V, є останнім; його порядковий номер 22. Круговий аркуш біля полюса, обмежений паралеллю у 88° широти, позначений буквою Z. Перед літерами, які позначають пояси північної півкулі, треба ставити букву N, а південної півкулі – букву S.

Для зображення 6-градусної зони треба декілька десятків аркушів мільйонної карти. *Шестиградусні смужки цих аркушів між двома сусідніми меридіанами з довготами, кратними 6° ,*

називають **колонами** (рис. 19). Колони позначають арабськими цифрами від 1 до 60 (аналогічно зонам), але їх лічбу починають від меридіана з довготою 180° у напрямку на схід. Тому номер колони відрізняється від номера зони на 30: перша колона (31-ша зона) обмежена меридіанами 180° і 174° , друга колона (32-га зона) – 174° і 168° західної довготи. Гринвіцький меридіан розмежовує 30-ту (у західній півкулі) і 31-шу (у східній) колони.

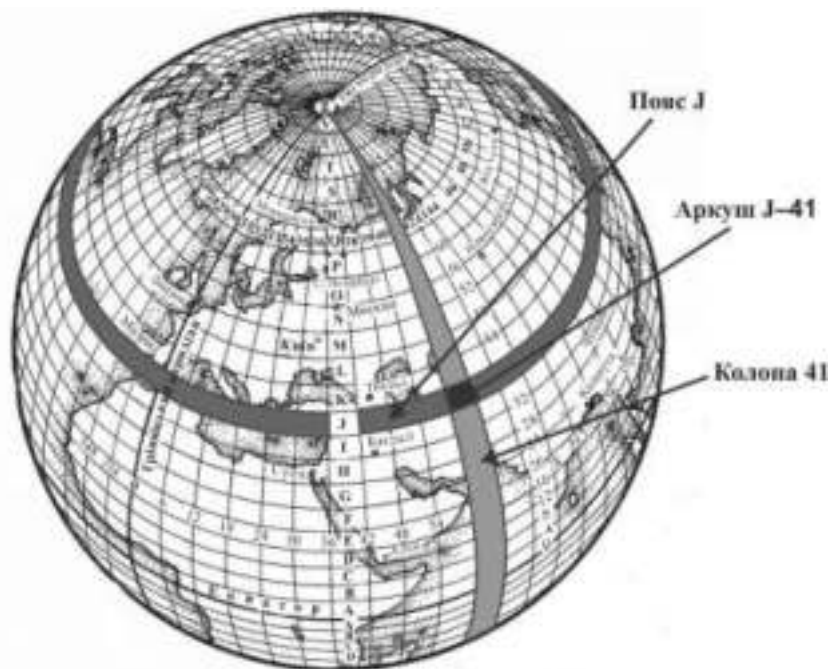


Рис. 19. Розграфлення поверхні еліпсоїда на аркуші карти мільйонного масштабу

Положення аркуша карти мільйонного масштабу у загальній системі позначень, тобто його номенклатура, описують буквеним позначенням широтного ряду і номером колони. Спочатку записують літеру поясу, потім через тире – номер колони. Так, аркуш мільйонної карти, розміщеної між паралелями 36° і 40° північної широти і між меридіанами 60° і 66° східної довготи, матиме номенклатуру J-41 (рис. 19). Територія України повністю розташована у північній півкулі, тому букви N і S перед номенклатурою карт не ставлять.

Аркуші карти з розмірами 4° на 6° видають для територій, розташованих між паралелями з широтою від 0 до 60° . Для терито-

рій між паралелями 60° і 76° листи здвоюють по довготі, тобто вони мають розміри відповідно 4° і 12° . Між паралелями 76° і 88° в один об'єднують чотири аркуші, площа яких у широтному напрямку дорівнює попереднім аркушам, але обмежена меридіанами з інтервалом по довготі в 24° . Топографічна карта приполярних областей має вигляд круга, обмеженого 88-ю паралеллю і з полюсом (північним або південним) у центрі. Номенклатура об'єднаних аркушів складається з літерного позначення ряду та відповідно двох або чотирьох чисел, які позначають колони. Наприклад: Р – 39, 40; Т – 37, 38, 39, 40.

Розграфлення аркушів карти масштабу 1:500 000 і більших виконують шляхом поділу мільйонного аркуша меридіанами і паралелями з певним інтервалом між ними для кожного масштабу. Разом з тим враховують умову: отримані аркуші карт усього масштабного ряду мають бути приблизно однакових розмірів, а меридіани і паралелі, що їх обмежують, повинні мати довготу і широту, виражені цілим числом хвилин і секунд.

Аркуші карти п'ятсоттисячного масштабу отримують із поділу мільйонного аркуша середнім меридіаном і середньою паралеллю на чотири частини. Зображення території в масштабі 1:500 000 у 4 рази більше, ніж аркуш мільйонної карти, оскільки довжини лінійних відрізків збільшуються удвічі при переході від мільйонного масштабу до п'ятсоттисячного. Для отримання аркушів, які дорівнюють за площею аркушеві вихідного масштабу, збільшений аркуш треба розрізати на чотири частини. Границями аркушів п'ятсоттисячної карти є меридіани, проведені через 3° , і паралелі, проведені через 2° . Окремі аркуші карти цього масштабу позначають великими кирилическими літерами: А, Б, В, Г (рис. 20, а).

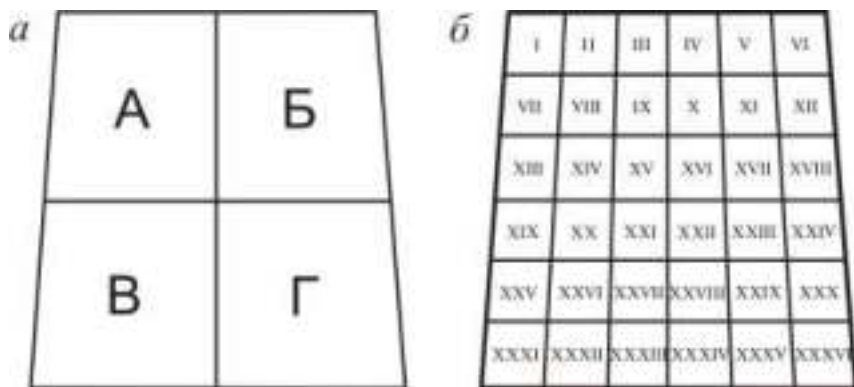


Рис. 20. Схеми розграфлення мільйонного аркуша на аркуші карт масштабів 1:500 000 і 1:200 000

Для побудови карти в масштабі 1:200 000 мільйонний аркуш розграфлюють меридіанами через 1° і паралелями через 40' на 36 частин. Аркуші двохсоттисячної карти нумерують зліва направо по рядах, використовуючи римські цифри від I до XXXVI (рис. 20, б). Номенклатура карти цього масштабу складається з номенклатури мільйонного аркуша та номера двохсоттисячного аркуша (наприклад, М-34-XXI).

Одному аркушеві мільйонної карти відповідають 144 аркуші карти стотисячного масштабу. Їх позначають арабськими цифрами від 1 до 144, нумерацію ведуть теж рядами зліва направо (рис. 21). Номенклатура карти складається з номенклатури мільйонного аркуша та номера стотисячного аркуша (наприклад, М-34-93).

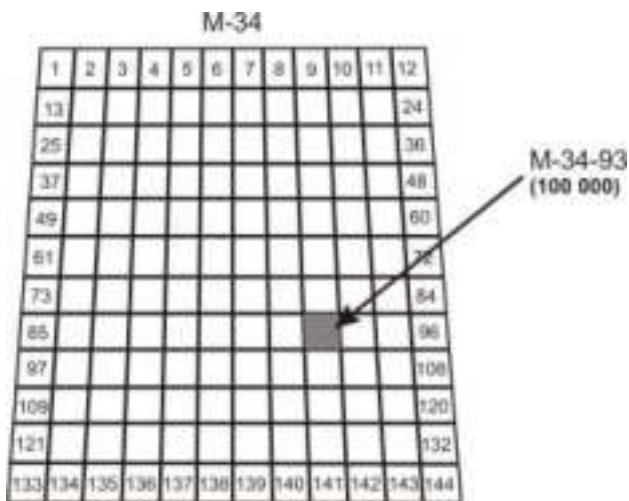


Рис. 21. Розграфлення мільйонного аркуша на аркуші карти 100 000 масштабу

Розграфлення аркушів карт масштабів 1:50 000, 1:25 000 і 1:10 000 виконують шляхом поділу на чотири частини аркуша карти попереднього масштабу. Спочатку стотисячний аркуш ділять на чотири п'ятдесятитисячних, потім п'ятдесятитисячний аркуш на чотири двадцятип'ятитисячних, і, нарешті, двадцятип'ятитисячний аркуш – на чотири десятитисячних аркуші. П'ятдесятитисячні аркуші позначають великими літерами А, Б, В і Г (наприклад, М-34-93-Б), двадцятип'ятитисячні – малими літерами а, б, в, г (М-34-93-В-б), а десятитисячні – арабськими цифрами 1, 2, 3, 4 (М-34-93-Г-г-4) (рис. 22). Вихідним для розграфлення на аркуші карт масштабів 1:5 000 і 1:2 000 також є аркуш карти масштабу 1:100 000. Одному аркушеві карти масштабу 1:100 000 відповідає 256 (16x16) аркушів

карти масштабу 1:5 000, які позначають цифрами 1, 2, 3, ..., 256 і дописують у дужках до номенклатури аркуша карти вихідного масштабу (рис. 23, а). Карти масштабу 1:5 000 можна також отримати, розділивши аркуш карти масштабу 1:10 000 на 4 частини.

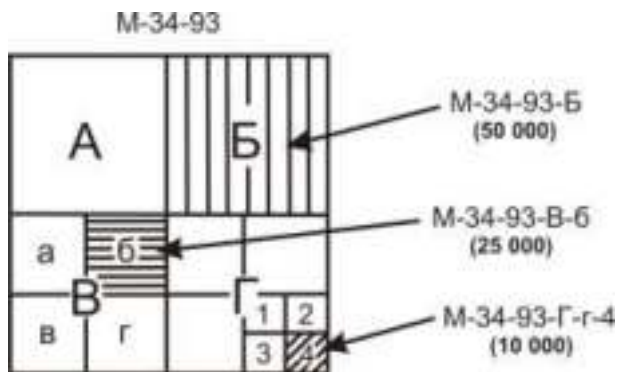


Рис. 22. Схеми розграфлення вихідного аркуша на аркуші карт масштабів 1:50 000, 1:25 000 і 1:10 000.

Одному аркушеві карти масштабу 1:5 000 відповідає 9 аркушів карти масштабу 1:2 000, які позначають малими буквами *а, б, в, г, д, е, ж, з, и* (рис. 23, б).

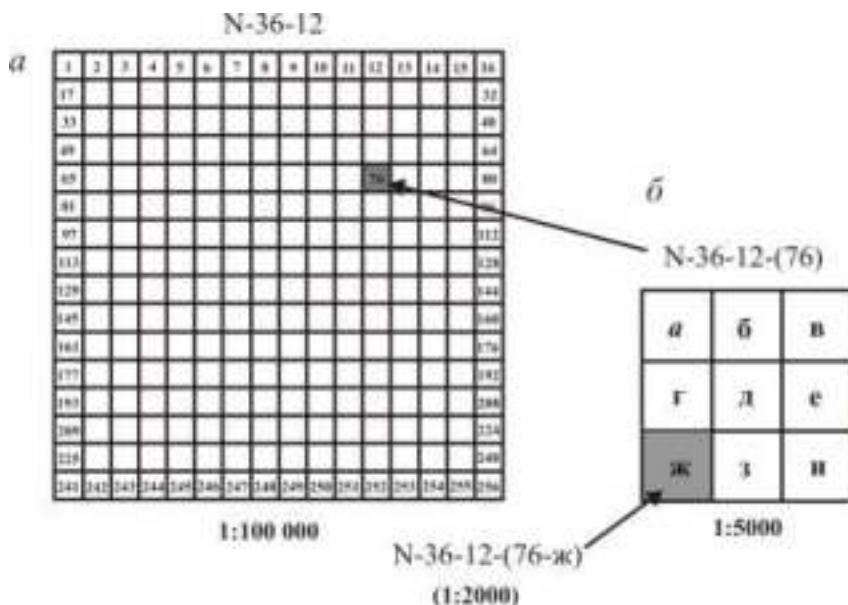


Рис. 23. Схеми розграфлення для карт масштабів 1:5 000 і 1:2 000

Прийняті схеми розграфлення обумовили сталі розміри аркушів топографічних карт одного масштабу (у кутових одиницях) і певні кількісні співвідношення між аркушами карт різних масштабів (табл. 8).

Таблиця 8

Розміри та кількісні співвідношення топографічних карт різних масштабів

Масштаб	Розмір аркуша		Кількість аркушів		Середня площа аркуша на широті 57°, км ²
	по довготі	по широті	в аркуші карти вихідного масштабу	в аркуші мільйонної карти	
1:1 000 000	6°	4°	1	1	175 104
1:500 000	3°	2°	4	4	43 776
1:200 000	1°	0° 40'	36	36	4864
1:100 000	0° 30'	0° 20'	144	144	1216
1:50 000	0° 15'	0° 10'	4	576	306
1:25 000	0° 07' 30"	0° 05'	4	2304	76
1:10 000	0° 03' 45"	0° 02' 30"	4	9216	19
1:5 000	0° 00' 52"	0° 01' 15"	256	36 864	4,75
1:2 000	0° 00' 37"	0° 00' 25"	9	331 776	0,53

Складання номенклатури топографічних карт виконують двома шляхами (рис. 24):

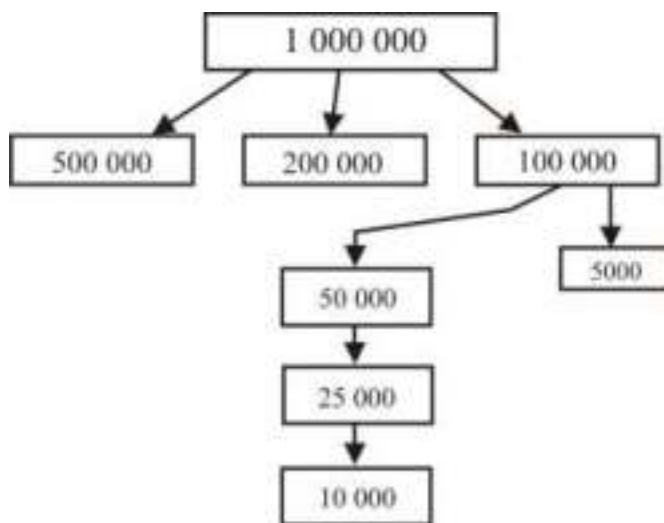


Рис. 24. Узагальнена схема розграфлення та складання номенклатури топографічних карт

1. Вихідний аркуш – основа для розграфлення на аркуші карт кількох масштабів: до номенклатури вихідного аркуша (1:1 000 000 або 1:100 000) дописують позначення листа конкретного масштабу. Таким чином складають номенклатуру аркушів карт масштабу 1:500 000, 1:200 000 і 1:100 000 на основі аркуша масштабу 1:1 000 000, аркуші карт масштабу 1:50 000 і 1:5 000 на основі аркуша карти масштабу 1:100 000.

2. Вихідний аркуш – основа для розграфлення аркушів одного масштабу: позначення аркуша карти конкретного масштабу дописують до номенклатури аркуша карти попереднього (вихідного) масштабу. Цю схему використовують для складання номенклатури аркушів карт масштабів 1:25 000; 1:10 000 і 1:2 000. Спільним для обох схем є те, що номенклатура аркуша карти будь-якого масштабу складатиметься з номенклатури вихідного для розграфлення аркуша та позначення аркуша певного масштабу.

Під час складання планів міст, населених пунктів і планів на ділянки поверхні, які за площею менші 20 км², як правило, а для масштабів 1:1 000 і 1:500 завжди використовують розграфлення по прямокутній координатній сітці з розмірами рамок 40×40 см для планів масштабу 1:5 000 і 50×50 см для планів масштабів 1:2 000, 1:1 000 і 1:500. У такому разі за вихідний для розграфлення приймають аркуш карти масштабу 1:5 000. Цей аркуш ділять на 4 аркуші масштабу 1:2000, двохтисячний аркуш – на 4 аркуші масштабу 1:1000 або на 16 аркушів масштабу 1:500 (рис. 25).

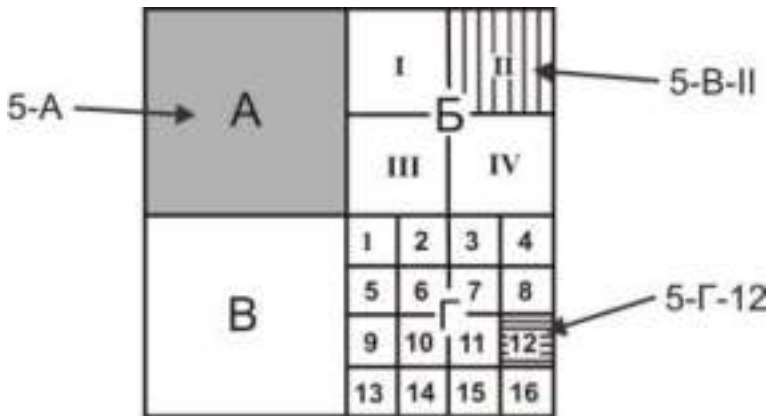


Рис. 25. Схема розграфлення топографічних планів

Позначення аркушів планів кожного з масштабів, а також їхні розміри вказані в табл. 9, а приклади номенклатури подані на рис. 25.

Позначення та розміри топографічних планів

Масштаб	Позначення аркуша	Розмір рамок аркуша, см	Вихідний аркуш для розграфлення	Площа аркуша, км ²
1:5 000	1, 2, 3,256	40×40	100 000	4
1:2 000	А, Б, В, Г	50×50	5 000	1
1:1 000	I, II, III, IV	50×50	2 000	0,25
1:500	1, 2, 3,16	50×50	2 000	0,0625

Номенклатуру аркушів топографічних карт записують над верхньою рамкою карти. Знаючи номенклатуру, можна визначити географічні координати кутів рамки трапеції. Посередині сторін зовнішньої рамки вказують номенклатуру сусідніх аркушів того ж масштабу.

5. РЕЛЬЄФ МІСЦЕВОСТІ ТА ЙОГО ВІДОБРАЖЕННЯ НА ТОПОГРАФІЧНИХ КАРТАХ

Під рельєфом розуміють сукупність різноманітних за формою та розмірами нерівностей земної поверхні. Рельєф є важливим компонентом географічного середовища, який впливає на клімат, гідрографію, рослинність й інші його елементи. Унаслідок одночасної дії ендегенних (передусім тектонічних рухів) і екзогенних процесів він з часом змінюється. В останні століття помітний вплив на рельєф здійснює людина у процесі господарської діяльності.

Кожна територія має свої особливості рельєфу. Для того, щоб описувати рельєф зрозумілими для всіх термінами, його прийнято розглядати як сукупність порівняно невеликої кількості типових або елементарних форм. Розрізняють прості та складні форми рельєфу. Першим властиві простота будови й обрисів (пагорб, озерна западина тощо), другі є поєднанням окремих простих форм (гірський хребет, низовина, горбогір'я тощо).

Форми рельєфу класифікують за розмірами, положенням щодо площини горизонту, походженням. За розмірами форми рельєфу традиційно поділяють на великі (макроформи), середні (мезоформи), дрібні (мікроформи) та дуже дрібні (наноформи). Макроформи мають великі лінійні розміри (десятки та сотні км), перевищення у їхніх межах змінюються від десятків метрів на рівнинах до тисяч метрів у горах (наприклад, рівнини, височини, гірські хребти, долини рік). Від сотень метрів до кількох кілометрів мають розміри мезоформи рельєфу (пагорб, гора, яр, балка), а

мікроформи – від перших метрів до кількох десятків метрів (вимоїни, кургани). Величина найдрібніших – наноформ рельєфу – визначена сантиметрами та десятками сантиметрів (кари, купини, мурашники). Доцільно також вирізняти мегаформи рельєфу планетарного масштабу, якими є гірські системи, серединноокеанічні хребти, абісальні рівнини океанів, шельфи, континентальні схили, підніжжя та ін.

За положенням стосовно денної поверхні форми рельєфу можуть бути позитивні (випуклі), які височіють над місцевістю, та негативні (ввігнуті), які розташовані нижче площини горизонту. Поширеними позитивними формами рельєфу є курган, горб, пагорб, гора, гряда, гірський хребет, плато; негативними – вимоїна, яр, балка, лощина, річкова долина, поди, улоговина, ущелина, каньйон.

Курган – невелике поодиноке підвищення на рівнині заввишки до 50 м із різко вираженою подошвою.

Горб – окреме куполоподібне або конічне підвищення заввишки до 100 м із різко вираженою подошвою.

Пагорб – окреме конічне або куполоподібне підвищення заввишки до 200 м із пологими схилами та слабо вираженою подошвою.

Гора – ізольоване підвищення заввишки понад 200 м із явно вираженою подошвою та стрімкими схилами. Елементами гори є вершина, схили й подошва.

Гряда – вузька видовжена височина зі стрімкістю схилів більше 20°, різко вираженою подошвою та відносною висотою до 200 м. За походженням, будовою, формою схилів і відносною висотою гряди можуть бути різні. Зазвичай вони невисокі й належать до форм мікро- та мезорельєфу (моренні гряди, озові гряди, барханні гряди).

Гірський хребет – витягнута в одному напрямку система піднята із відносною висотою понад 200 м і стрімкими схилами по обидва боки.

Плато (франц. plateau, від plat – плоский) – рівнина, порівняно високо піднята над рівнем моря, обмежена стрімкими схилами, інколи уступом.

Яроподібна вимоїна (ярок, вимоїна) – вузька й неглибока (ширина та глибина до 1–3 м) лінійна заглибина на схилах, яка є найпоширенішою формою глибинної ерозії.

Яр – лінійно витягнута ерозійна форма рельєфу заглибки більше 3 м із V-подібною формою поперечного перерізу, різко вираженою брівкою та стрімкими, переважно незадернованими схилами. Яри формуються з вимоїн унаслідок розмивання та

винесення великих мас ґрунту й порід тимчасовими потоками талих і дощових вод. У гирловій частині ярів розташовані конуси виносу, складені пролювіальним матеріалом.

Балка – видовжене поглиблення з ухилом по тальвегу, вираженим рівним дном, яке різко переходить у задерновані схили. У типовому вираженні має глибину до 30 м, ширину дна до 45–50 м. На дні балки залягають делювіальні відклади.

Лощина – невелике витягнуте поглиблення з широким плоским дном, пологими схилами, які поступово переходять у локальні вододіли.

Долина річкова – порівняно вузьке, протяжне (десятки, сотні й більше км), часто звивисте поглиблення з явно вираженими схилами, утворене постійним потоком річкової води. Елементами річкової долини є русло (річище), заплава, надзаплавні тераси та схили.

Пода – неглибоке замкнуте пониження округлої, овальної або видовженої форми невеликого розміру. Поширене у степу.

Улоговина – витягнуте пониження на земній поверхні, обмежене з усіх боків гірськими пасмами.

Котловина – западина округлої, овальної або неправильної форми з чашоподібним чи плоским дном і розміром від кількох десятків метрів до кількох сотень кілометрів.

Сідловина – пониження між двома сусідніми гірськими вершинами або підняттями, що за формою нагадує сідло.

Ущелина – вузька і глибока долина зі стрімкими, часто обривистими та скелястими схилами. Ущелину із вертикальними стінками, які іноді нависають, називають *тіснинною*.

Каньйон – глибока річкова долина з дуже стрімкими схилами й порівняно вузьким дном, яке часто (особливо у горах) цілком зайняте руслом.

Кожна з цих форм рельєфу має свої елементи, головними з яких є підшва, схил, вершина горба, пагорба, гори; дно і схил котловини або долини (лощини та ін.); русло, заплава й тераси річкової долини і т. д.

Важливим і дуже поширеним елементом різних форм рельєфу є схили. Під час їхнього вивчення треба звертати увагу на такі аспекти:

- а) експозицію – сторону світу, до якої нахилений схил;
- б) форму поверхні (прямі, увігнуті, випуклі, східчасті);
- в) стрімкість (кут схилу), за якою їх поділяють на дуже пологі (2–4°), пологі (4–8°), схили середньої стрімкості (8–15°), стрімкі (15–35°), дуже стрімкі (більше 35°).

Досить часто для опису рельєфу використовують також *головні орографічні (скелетні) лінії*, які можна уявно або графічно провести по окремих формах рельєфу або їхній сукупності. Серед них розрізняють: *вододіл, тальвег, брівку, підошву*. **Вододіл** – лінія, яка розділяє стік атмосферних опадів по обох схилах, спрямованих у різні боки. Вододіли проходять через найвищі точки місцевості, мають ієрархічну структуру, можуть бути місцевими та регіональними. **Тальвег** (лінія водотоку) – лінія, що сполучає найнижчі точки дна річкової долини, балки, яру, лощини. На топографічних картах горизонталі у місцях перетину з лінією тальвегу дуже вигнуті. Сукупність вододілів і тальвегів, проведених на карті, дає зображення рельєфу, очищене від дрібних деталей (ніби скелет рельєфу). Тоді краще видно особливості взаємного розташування форм рельєфу, їхню протяжність, ступінь розчленування земної поверхні.

Брівка – лінія, яка проходить через точки, нижче яких схил стає стрімкішим.

Підошва – лінія, яка поєднує точки, нижче яких схил стає пологішим.

Рельєф місцевості – один із найважливіших елементів карт і планів, однак відобразити його на таких ортогональних проєкціях земної поверхні досить складно. Рельєф – просторовий об'єкт, і його, як правило розглядають у перспективі, тоді як зображають на площині. Для відображення рельєфу на картографічних матеріалах розроблено цілу низку способів: висот (позначок висоти), штрихів, відмивання, тушування і горизонталей. Кожен зі способів має свої недоліки або переваги, однак повноцінне за інформативністю зображення рельєфу має відповідати низці вимог:

- наочно відображати рельєф;
- визначати тип рельєфу і ступінь розчленування земної поверхні;
- давати змогу швидко й легко одержувати кількісні характеристики нерівностей місцевості;
- відображати планові обриси форм рельєфу, їхнє орієнтування та просторове положення;
- містити абсолютні й відносні висоти точок місцевості;
- нести інформацію про глибину врізу річок, долин, балок і ярів;
- відображати напрямки і стрімкість схилів та ін.

Цим вимогам повною мірою відповідає широко вживаний **спосіб ізоліній** – кривих, які з'єднують точки з однаковими кількісними значеннями. Форму й особливості об'єкта (у цьому разі

рельєфу) передають не окремою лінією, а їх сукупністю. На топографічних картах такі ізолінії називають *горизонталлями*, тобто замкнутими лініями, які проходять через точки місцевості з однаковою абсолютною висотою. Ідея відображення нерівностей земної поверхні за допомогою ізоліній належить голландському землемірові Пітеру Бнюенсу, який у 1584 р. за допомогою ізобат (ліній однакової глибини) показав рельєф ложа р. Спарне. Пізніше цей спосіб детально розробили та вдосконалили французькі вчені Філіп Бюан і Дюпен Тріель. Останній у 1791 р. склав карту Франції із зображенням рельєфу горизонталлями.

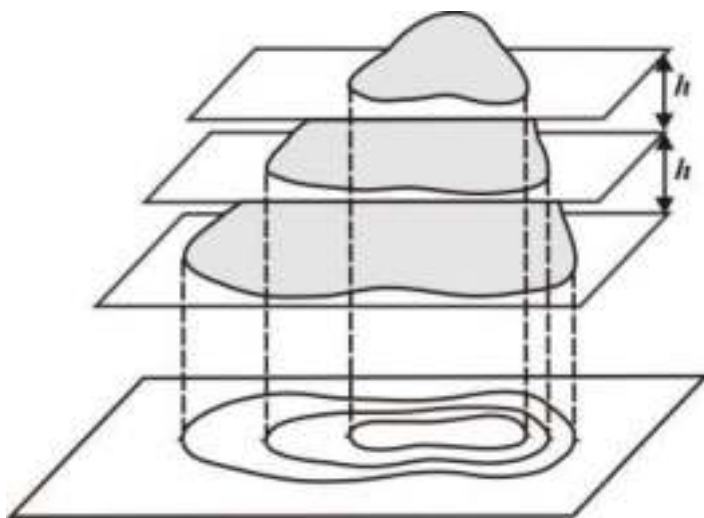


Рис. 26. Геометричний зміст горизонталей

Спосіб ізоліній достатньо простий у реалізації, дає змогу геометрично найточніше передавати форми рельєфу та відображати його особливості. Суть способу полягає у перетині фізичної поверхні уявними рівновіддаленими горизонтальними площинами, які є фрагментами рівневих поверхонь (рис. 26). Кожна з отриманих ліній перетину матиме вигляд замкненої кривої та постійну висоту, що й визначено поняттям горизонталь. На місцевості горизонталі відповідає берегова лінія (межа води і суші) ставків, озер. Отже, *горизонталь* – це слід від перетину фізичної поверхні Землі рівневою або, іншими словами, це лінія, яка зображає геометричне місце точок земної поверхні з однаковими висотами. Січні поверхні проводять через рівні проміжки по висоті, а одержані лінії перетину проєктують на поверхню еліпсоїда (для зображення їх на карті) або на горизонтальну площину (для зображення їх на плані).

Відстань *h* уздовж прямовисної лінії між двома суміжними січними рівневими поверхнями називають **висотою перерізу** рельєфу. Вона залежить від особливостей рельєфу місцевості й масштабу карти (табл. 10). На одному аркуші карти висота перерізу постійна. На картографічних матеріалах значення висоти перерізу рельєфу прийнято записувати під лінійним масштабом; його можна визначити також як різницю висот двох сусідніх основних горизонталей.

Таблиця 10

Значення перерізу для різних типів рельєфу

Тип рельєфу	Висоти перерізу рельєфу для карт різних масштабів, м					
	5 000	10 000	25 000	50 000	100 000	200 000
Плоско-рівнинний	0,5	2,5	2,5	10	20	20
Слаборозчленований	1	2,5	5	10	20	20
Гірський	2,5	5	5	10	20	40
Високогірний	–	–	10	20	40	40

Горизонталі, отримані за прийнятої для певної карти висоти перерізу рельєфу, називають **основними**. Іноді деталі рельєфу не можуть бути відображені лише основними горизонталями. У таких випадках використовують додаткові або половинні горизонталі (**напівгоризонталі**), проведені через половину висоти перерізу рельєфу (рис. 27). На картах додаткові горизонталі викреслюють пунктирними лініями з довжиною рисочок 4–5 мм і відстанню між рисочками 1–2 мм залежно від масштабу карти. Одноїменні напівгоризонталі обов'язково показують на протилежних схилах вершин або сідловин (називають їх **відповідними**). Подекуди наносять ще **допоміжні** горизонталі, які проводять на необхідній для точного відображення рельєфу висоті (часто вона дорівнює $\frac{1}{4}$ висоти перерізу). Допоміжні горизонталі, як правило, мають бути підписані. Горизонталі й напівгоризонталі зображені на топографічних картах лініями **ясно-коричневого** кольору.

Висоти окремих горизонталей підписують, роблячи в них розрив у місцях, зручних для читання, і так, щоби верх цифр був спрямований у бік підвищення схилу. Значення основних горизонталей завжди кратні висоті перерізу рельєфу. Для більшої наочності, зручності відраховування і визначення висот горизонталей на картах проводять потовщеною лінією **кожну п'яту** (починаючи від 0) горизонталь, якщо висота перерізу дорівнює 5, 10, 20 і 40 м, і **кожну десятю**, якщо висота перерізу дорівнює 2,5 м. Щоб можна було розрізнити зображення горизонталями гори від

улоговини, хребта від долини, від горизонталей у бік пониження схилу рисують коротенькі (1 мм) рисочки – *бергштрихи* (*схилштрихи*) (рис. 27).

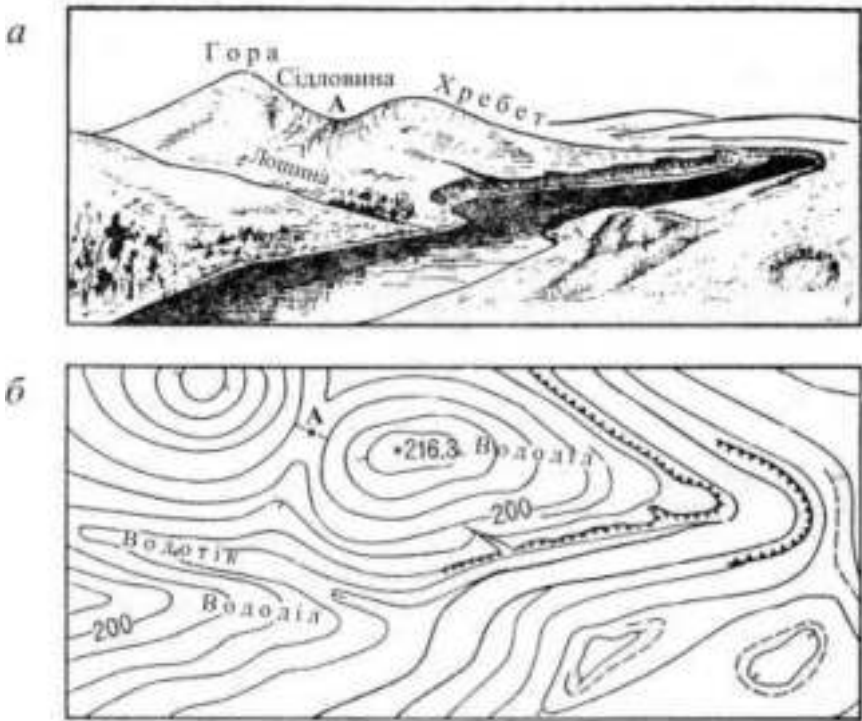


Рис. 27. Рельєф ділянки місцевості (а) та відображення його горизонталями й додатковими умовними знаками (б)

Зображення рельєфу горизонталями доповнюють цифровими позначеннями абсолютних висот характерних точок місцевості й відносними висотами обривів, терас, глибини і ширини ярів та інших елементів рельєфу. Додатково використовують умовні знаки для тих форм рельєфу, які не можуть бути показані горизонталями (ями, яри, обриви, кургани та ін.). Форми рельєфу природного походження рисують ясно-коричневим кольором, а штучні – чорним. Чорним кольором прийнято показувати також природні скельні виступи, окремі камені та їхні скупчення, які добре помітні на місцевості.

На відміну від сталої величини перерізу рельєфу, відстань між горизонталями на карті є мінливою та залежить від стрімкості схилу. Відстань на карті між двома сусідніми горизонталями у

заданому напрямку називають **закладенням горизонталей**, а найкоротшу відстань між ними – **закладенням схилу**. Якщо графічно зобразити профіль схилу та перетнути його січними горизонтальними поверхнями через рівні проміжки по висоті h , то можна виділити три геометричні елементи цього схилу: **висоту перерізу (h)**, **закладення (d)** і його **стрімкість (v)**, виражену в градусах (рис. 28).

Між закладенням d , висотою перетину h і стрімкістю схилу v є така залежність:

$$\text{tg } v = h/d. \quad (5.1)$$

Звідси випливає, що зі збільшенням стрімкості схилу при висоті перерізу h закладення буде меншим і, навпаки, воно буде більшим зі зменшенням стрімкості схилу. Ця закономірність дає змогу розпізнавати на карті порівняно стрімкі схили, показані зближеними горизонталлями, та порівняно пологі – відображені віддаленими одна від одної горизонталлями.

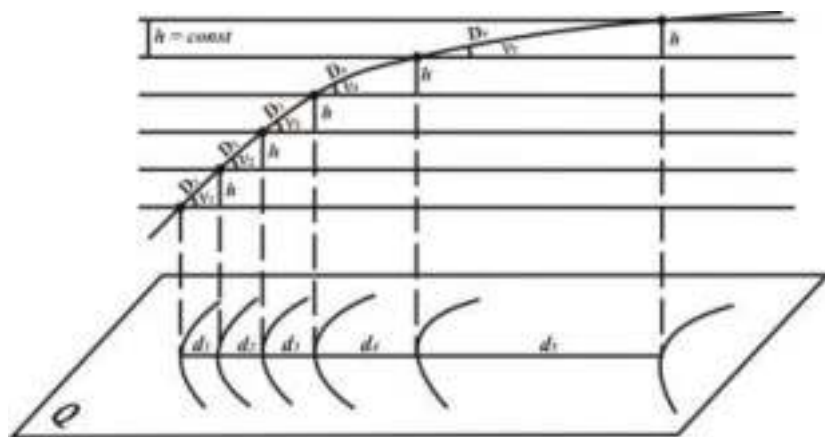


Рис. 28. Зв'язок між закладенням і стрімкістю схилу

За значенням закладення можна визначати стрімкість схилу також кількісно. Це завдання здебільшого розв'язують за допомогою спеціального графіка закладень, зображеного під південною рамкою карти (рис. 29). Графік ілюструє тангенціальну залежність між кутом схилу та його закладенням за використаного значення перерізу рельєфу. На графіку вертикальні відрізки між горизонтальною лінією та кривою графіка відповідають закладенням за конкретного значення кута нахилу, записаного нижче. Для знаходження кута схилу спочатку вимірюють циркулем відстань між двома сусідніми горизонталлями на карті, а пізніше

приставляють його до графіка закладень таким чином, щоб голка однієї ніжки була розташована на горизонтальній прямій, а голка іншої ніжки – стала на графік.

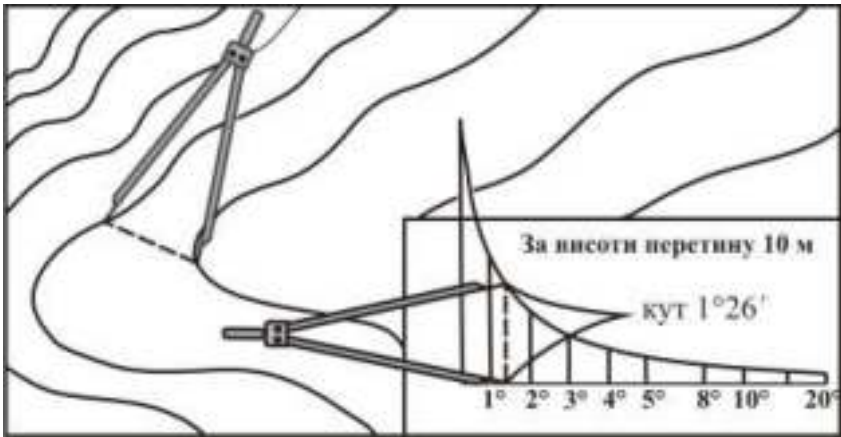


Рис. 29. Визначення кута схилу за графіком закладень

Точність визначення кута схилу на карті залежить від його значення: чим стрімкіший схил, тим більша похибка у висотному положенні горизонталей. Доведено, що за графіком закладень кут схилу до 5° можна виміряти з точністю до $30'$, а $5-10^\circ$ – з точністю до 1° . Для схилів зі стрімкістю понад 20° кут нахилу рекомендовано розраховувати через тангенс кута схилу.

Описаний вище спосіб відображення рельєфу на картографічних матеріалах обумовив низку **властивостей горизонталей**:

1) усі точки, що лежать на одній горизонталі, мають однакову висоту, яка дорівнює висоті цієї горизонталі й відрізняється від висоти точок сусідньої основної горизонталі на висоту перерізу рельєфу;

2) горизонталі на карті не перетинаються (у разі зображення ділянок схилів значної стрімкості – зливаються);

3) усі горизонталі, які замикаються у межах карти, відображають окрему форму рельєфу, а якщо не замикаються, то показана лише її частина;

4) вододільні лінії та водозливи лощин перетинають горизонталі під прямим кутом;

5) найкоротша відстань між двома сусідніми горизонталями відповідає напрямковій схилу та напрямковій його найбільшій стрімкості;

б) чим ближче горизонталі розміщені одна біля одної, тим схил стрімкіший; за значенням закладення можна визначити стрімкість схилу;

7) чим більше горизонталей на схилі, тим він вищий і стрімкіший.

6. ВИМІРЮВАННЯ ДОВЖИН ЛІНІЙ НА МІСЦЕВОСТІ

Вимірювання відстаней (лінійні вимірювання) є необхідною складовою будь-якого виду топографо-геодезичних робіт на місцевості. Їх виконують для визначення горизонтальних відстаней (закладень) між точками. Довжину лінії на місцевості визначають безпосереднім або посереднім способами. Безпосередній спосіб вимірювання відстані полягає у послідовному вкладанні мірного засобу у створі лінії. Під час посереднього способу довжину лінії визначають як функцію відомих геометричних або фізичних співвідношень. Геометричні співвідношення використовують для аналітичних обчислень шуканих відстаней за вимірними базисами і кутами, а також в оптичних віддалемірах. Фізичні співвідношення для вимірювання відстаней покладені в основу конструкцій електрофізичних приладів – світло-, радіо- та лазерних віддалемірів. Залежно від призначення і виду геодезичних робіт, вимог до їхньої точності, а також умов місцевості, застосовують той чи інший спосіб і прилад для вимірювання довжини ліній.

6.1. Засоби для вимірювання відстаней безпосереднім способом

Для безпосереднього вимірювання відстаней використовують механічні мірні засоби, якими є *мірні (землемірні) стрічки, рулетки, інварні дроти, польові циркулі*. Мірні стрічки – це сталеві смужки завдовжки 20, 24 або 50 м, завширшки 15–20 мм і завтовшки 0,4–0,6 мм з ручками на кінцях. Найпоширенішими є стрічки завдовжки 20 м. Мірні стрічки бувають двох типів: штрихові та шкалові. На краях штрихових стрічок зроблено прорізи, проти центрів яких нанесено штрихи (рис. 30, а). Відстань між штрихами відповідає номінальній довжині стрічки. На обох боках стрічки нанесено шкалу: від 0 до 20 м з одного боку та від 20 до 0 м – з іншого. Метри на стрічці позначено цифрами на прямокутних або овальних металевих пластинах, півметрові поділki – металевими заклепками, а дециметрові – круглими отворами. Сантиметри відлічують окомірно з точністю до 0,01 м. Шкалові стрічки мають на початку і в кінці шкали з сантиметровими та міліметровими поділками і відлік по них беруть від нульової позначки (рис. 30, б). Їх використовують для вимірювання відстаней з підвищеною

точністю. Для зручності у користуванні стрічки намотують на залізні кільця зі скобами (рис. 30, б).

Разом зі стрічками використовують комплект із 6 або 11 шпильок. Шпильки виготовляють зі сталюго дроту діаметром 5 мм і довжиною 30 см (рис. 30, в). Під час вимірювання шпильки вставляють у прорізи на кінцях стрічки і для фіксації встромляють у ґрунт. Щоб досягти під час вимірювань постійних натягів стрічки, в комплект до стрічки додають динамометр, а для врахування температури стрічки – термометр.

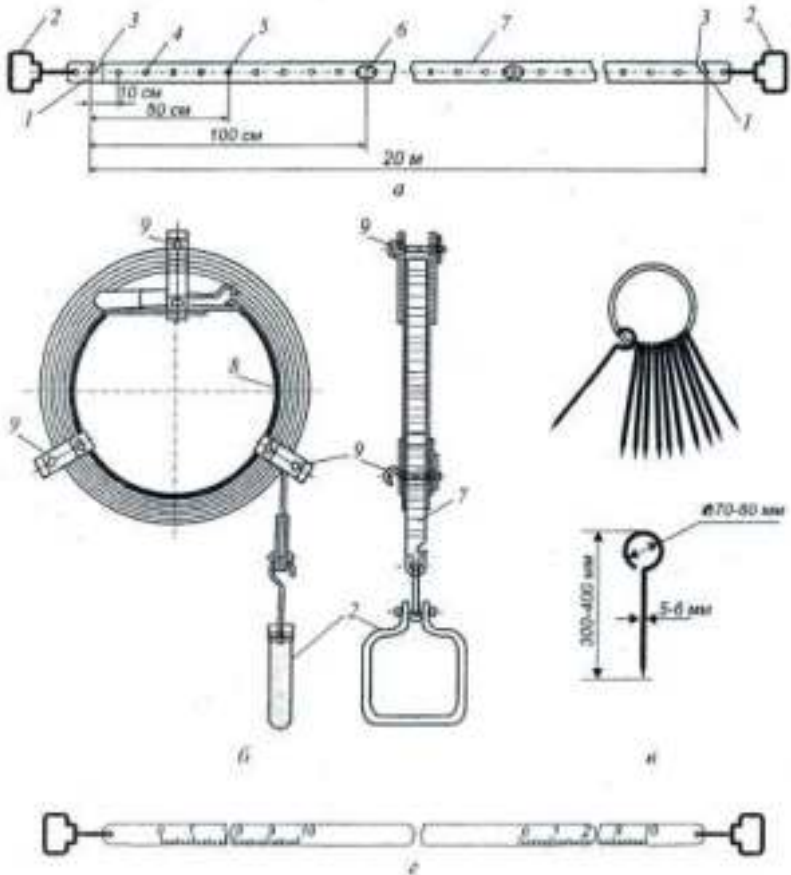


Рис. 30. Мірні стрічки:

1 – штрихи; 2 – ручки; 3 – вирізи-гачки; 4 – дециметрові отвори; 5 – мідні бланки для позначення півметрових інтервалів; 6 – мідні пластини з порядковими номерами метрів; 7 – полотно стрічки; 8 – кільце для намотування стрічки; 9 – гвинти для кріплення під час транспортування і зберігання

Для вимірювання коротких (до 100 м) відстаней під час інженерно-геодезичних, маркшейдерських і будівельних робіт використовують *рулетки* (рис. 31). Рулетки можуть бути сталеві або фібергласові, з довжиною смуги 5, 10, 20, 30 і 50 м, яка у неробочому стані намотана на котушку. На рулетці міліметрові поділки нанесено по всій довжині або тільки на першому дециметрі. Сантиметрові поділки наносять по всій довжині.



Рис. 31. Рулетка

Для виконання особливо точних вимірювань застосовують *інварні дроти* завдовжки 24 і 48 м, які належать до підвісних мірних пристроїв. Інвар – сплав з 64 % сталі і 36 % нікелю, який має винятково малий температурний коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6}$ (для порівняння: сталь має $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$). Такий дріт послідовно натягують між сусідніми штативами, які рівномірно розставлені уздовж лінії. Робота з інварними дротами потребує великих затрат праці й часу, тому їх використовують для високоточного перенесення на місцевість проектних розмірів, компарування мірних приладів, вимірювання базисів у триангуляції та полігонометрії.

Виміряти відстань із невеликою точністю можна також *польовим циркулем* (рис. 32). Це дві жердини, міцно скріплені під кутом так, щоб між їхніми кінцями зберігалася постійна відстань 1 або 2 м. Тримавши циркуль за ручку, його переставляють (“крокують”) по лінії, яку треба виміряти.



Рис. 32. Польовий циркуль

Перед початком і періодично у процесі вимірювань відстаней на місцевості визначають фактичну довжину стрічки або рулетки, яка часто відрізняється від номінальної. Ця різниця у довжині виникає, як правило, під час виготовлення стрічки або у процесі експлуатації. Для зіставлення довжин мірний засіб (робочу міру) порівнюють із другим мірним засобом, довжина якого відома (нормальна, або еталонна міра). Нормальні міри дбайливо

зберігають і використовують лише для порівняння з ними робочих. *Процес порівняння довжини робочої міри з нормальною називають компаруванням.* Якщо робочий засіб для вимірювання відстаней має однакову довжину з еталоном, то на рівному майданчику безпосереднього визначають різницю їхніх довжин. Стрічку-еталон розмотують, вирівнюють і злегка натягують. Біля кінців стрічки забивають кілки так, щоб на них проектувалися кінцеві штрихи стрічки. Один кінець стрічки закріплюють, а на іншому фіксують динамометр і натягують її з силою 98,07 Н. На кілках олівцем маркують положення штрихів, які позначають початок і кінець стрічки. Контрольну стрічку забирають, а на її місце укладають робочу стрічку, яку теж натягують із силою 98,07 Н. Штрих початку стрічки суміщають зі штрихом на задньому кілку, а на передньому кілку відмічають положення кінця стрічки. Якщо відстань між штрихами не перевищує 2 мм, то робоча стрічка є правильною. Якщо ж ця відстань більша, то обчислюють поправку за компарування:

$$\Delta l_k = l - l_e, \quad (6.1)$$

де l, l_e – довжини відповідно робочої та еталонної стрічок, м.

Під час чисельних вимірювань на місцевості та у випадках, коли робоча міра за величиною неспівмірна з еталоном, для порівняння використовують *польовий компаратор*. Таким компаратором є лінія на рівній місцевості завдовжки 100–200 м, кінці якої закріплені вкопаними врівень із землею бетонними пірамідками. У верхні зрізи пірамідок вмуровані металеві марки з хрестовою насічкою. Довжину польового компаратора (відстань між марками) визначають за допомогою еталонної стрічки, обов'язково використовуючи для вимірювання залишку лінії міліметрову лінійку. За довжину компаратора приймають середнє арифметичне з кількох вимірювань. Аналогічні вимірювання компаратора виконують робочою стрічкою. Порівнявши довжини компаратора, визначають поправку робочої стрічки за компарування:

$$\Delta l_k = (D_K - D_R) / n, \quad (6.2)$$

де $n = D_R / l$ – кількість відкладень робочої міри довжиною l між крайніми точками компаратора.

Стрічки і рулетки змінюють свою довжину зі зміною температури відповідно до лінійного розширення матеріалу, з якого вони виготовлені. Тому визначена поправка дійсна за тієї температури, за якої виконували компарування. Якщо у процесі вимірювання температура суттєво відрізняється від температури

компарування, то у результат вимірювання вводять поправку за температуру

$$\Delta D_t = \alpha (t - t_k) D, \quad (6.3)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу, з якого виготовлене полотно;

t , t_k – температура стрічки під час вимірювання і компарування;

D – виміряна довжина лінії.

Якщо різниця температур не перевищує 8° , то поправку за температуру можна не вводити.

6.2. Методика вимірювання відстані на місцевості мірними стрічками (або рулетками)

Пряма лінія буде визначена на місцевості, якщо її закріпити у двох кінцевих точках. Однак фізична поверхня землі нерівна, профіль місцевості між двома точками А і В є кривою, з якою пряма АВ не збігається (рис. 33). Тому прийнято говорити про *створ лінії* – *вертикальну площину, яка проходить через кінцеві точки лінії*. Щоб точно виміряти відстань між двома точками, мірний засіб треба чітко вкладати у створі їх лінії. Положення крайніх точок лінії на місцевості найпростіше позначити і закріпити дерев'яними кілками (15–30 см завдовжки і 3–5 см у діаметрі). Забитий у землю кілок називають *точкою*, або *пікетом*. Якщо кілок забитий врівень із землею, то біля нього забивають другий кілок – *сторожок*, який височіє на 15–20 см вище поверхні землі й ніби стереже закріплену точку, полегшуючи її відшукування. На сторожках вказують номери точок. Замість дерев'яних кілків можуть бути використані обрізки арматури, металевих труб, а у міських умовах в асфальт забивають залізні цвяхи або костилі.

Створ лінії на місцевості позначають *віхами*. Раніше віхи виготовляли у формі рівних дерев'яних жердин завдовжки 1,5–2,5 м, пофарбованих смугами через 20 см у червоний і білий колір та обладнаних на нижньому кінці загостреним металевим наконечником. На сьогодні віхи виготовляють переважно алюмінієві або фібергласові, телескопічні за конструкцією, різної довжини (до 4 м), обладнані круглим бульбашковим рівнем для виставлення у прямовисне положення. Під час вимірювання коротких (до 100–150 м) ліній в умовах рівнинної місцевості достатньо виставити віхи у кінцевих точках. Для вимірювання довгих ліній, особливо в умовах складного рельєфу, у створі лінії встановлюють низку додаткових віх. *Процес виставлення віх у створі лінії називають провішуванням лінії*. Як правило, віхи встановлюють через 100–200 м на рівнині та значно частіше – на

горбистій місцевості. Залежно від довжини лінії, особливостей місцевості й необхідної точності провішування виконують “на око”, за допомогою польового бінокля або зорової труби теодоліта. Спочатку виставляють віхи у крайніх точках. Якщо між кінцевими точками лінії хороша видимість, то провішування здійснюють способом “на себе” (див. рис. 33, а).

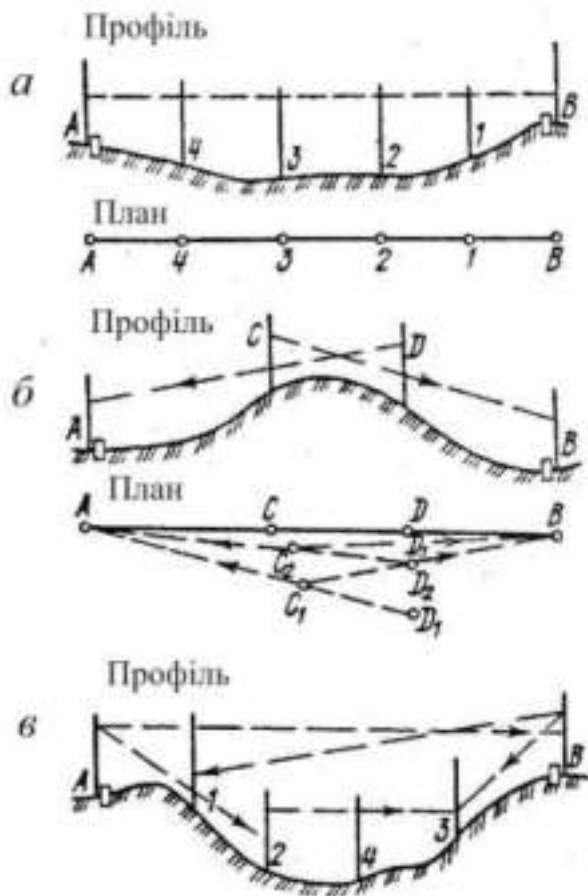


Рис. 33. Провішування лінії

Для цього один геодезист стає перед вихідною точкою за 1–2 м від віхи та дивиться уздовж створу лінії, щоб віха А закривала собою дальню віху В. Другий геодезист за його сигналами по чергово встановлює віхи 1, 2, 3, 4 у такі положення, щоб кожна з них закривала собою дальню та ховалася за віху точки А. Якщо немає прямої видимості між точками (наприклад, через горб), застосовують спосіб *поступового наближення до створу лінії*

(рис. 33, б). Біля віх у точках А і В стають геодезисти, а на схилі у довільно вибраних точках С₁ і D₁ – помічники з віхами. Геодезист у точці В керує зміщенням віхи D₁ у створ лінії С₁-В (положення D₂). Геодезист на точці А допомагає вивести у створ лінії D₂-А віху С₁ (положення С₂). Такі маніпуляції проводять до тих пір, поки віхи не стануть по лінії А-В. Провішування лінії через яр виконують східчасто у порядку, показаному на рис. 33, в.

Вимірювання довжини лінії мірною стрічкою (або рулеткою) виконують двоє осіб. Стрічку розмотують і натягують у напрямку лінії. Передній геодезист бере в одну руку стрічку, а в іншу – 5 (10) шпильок. Задній геодезист суміщає нульовий штрих стрічки з початком вимірюваної лінії та через проріз вертикально встромлює свою єдину шпильку в землю. Потім рукою показує передньому геодезистові, як покласти стрічку, щоб вона була у створі поставлених віх. Передній геодезист натягує стрічку і через проріз проти 20-го штриха втикає у землю першу шпильку. Таким чином стрічку певної довжини відкладають уздовж лінії перший раз. Витягнувши задню шпильку (на початковій точці) і звільнивши передній кінець стрічки, геодезисти йдуть уперед уздовж провішеної лінії. Коли задній геодезист закріпить стрічку за шпильку, залишену переднім, її відкладають другий раз і т.д. Якщо довжина лінії більша 100 (200) м, то після того, як передній геодезист поставив останню п'яту (десяту) шпильку, задній передає йому п'ять (десять) шпильок і відмічає цю передачу в журналі. Для вимірювання залишку, який називають *доміром*, стрічку черговий раз вкладають у створі лінії, стежачи за тим, щоб підписи метрових поділок збільшувалися у напрямку руху. Натягнувши і зафіксувавши стрічку, передній геодезист повертається на останню точку лінії та знімає по стрічці відлік.

Довжину лінії, виміряної стрічкою ЛЗ-20, визначають за формулою:

$$D = A \cdot N + l \cdot n + r, \quad (6.4)$$

де $A = 100$ (якщо 6 шпильок) і $A = 200$ (якщо 11 шпильок);

N – число передач шпильок;

n – кількість шпильок у заднього геодезиста;

l – довжина стрічки;

r – залишок.

У разі недостатньої точності мірного засобу вводять поправку за компарування

$$\Delta D_k = \Delta l_k D / l. \quad (6.5)$$

Кожну лінію вимірюють двічі, у прямому та зворотному напрямках і за кінцевий результат приймають середнє значення.

6.3. Визначення відстані до недосяжних об'єктів

Під час вимірювання відстаней мірними стрічками або рулетками подекуди доводиться долати яри, річки, густі зарості кущів, болота і т. д. За таких умов безпосередньо виміряти відстань на місцевості неможливо, і її визначають геометричним способом. З точки А вимірюють стрічкою лінії $AM = b_1$ і $AN = b_2$, які називають базисами, та кути γ_1, γ_2 і β_1 і β_2 (рис. 34).

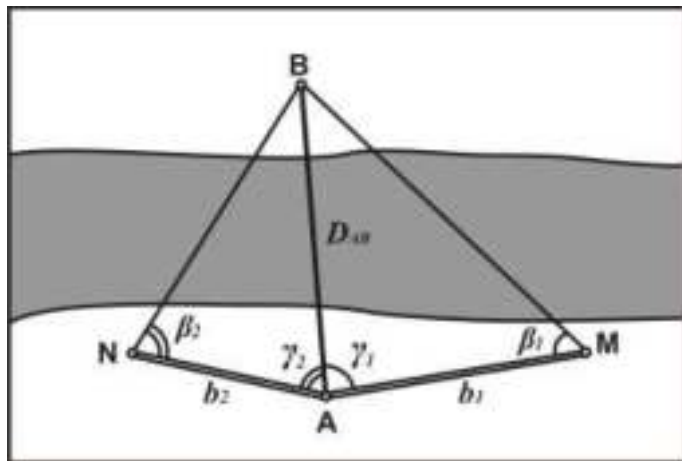


Рис. 34. Геометричні побудови для визначення відстані

Базиси за можливості вибирають з таким розрахунком, щоби протилежні їм кути були не меншими 30° і не більшими 150° . Довжину сторони D_{AB} знаходять за теоремою синусів:

$$\begin{aligned} D'_{AB} &= b_1 \cdot \sin \beta_1 / \sin(\beta_1 + \gamma_1); \\ D''_{AB} &= b_2 \cdot \sin \beta_2 / \sin(\beta_2 + \gamma_2). \end{aligned} \quad (6.6)$$

За кінцевий результат беруть середнє арифметичне цих величин.

6.4. Вимірювання відстаней посереднім способом

Для вимірювання відстаней посереднім способом використовують віддалеміри, які дають змогу швидко знаходити відстані з достатньою точністю і без попередньої підготовки лінії на місцевості. Однак такі прилади не пристосовані для відкладення проектної віддалі (розмірів) на місцевості. Віддалеміри бувають оптичні й електрофізичні.

Оптичні віддалеміри – геодезичні прилади, за допомогою яких визначають горизонтальні та похилі відстані через відомі геометричні співвідношення. Їхнє застосування особливо ефективно під час виконання геодезичних робіт у пересіченій, заболоченій чи

залісненій місцевості, де використання механічних приладів ускладнене або взагалі неможливе.

В основі принципу вимірювання відстаней за допомогою оптичного віддалеміра лежить залежність між сторонами паралактичного трикутника, у якому відомі базис b та паралактичний кут β – кут при вершині трикутника, значення якого менше 1° (рис. 35). Конструкцією оптичних віддалемірів передбачено, що одна з величин (кут β або базис b) є сталою, а друга змінна і підлягає вимірюванню. У зв'язку з цим вони бувають двох типів: а) з постійним паралактичним кутом і змінним базисом; б) з постійним базисом і змінним кутом.

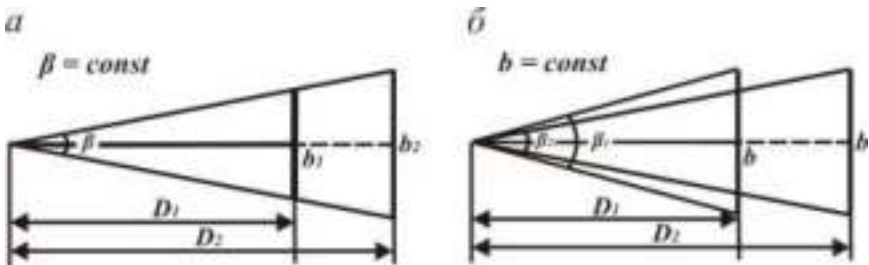


Рис. 35. Принцип роботи оптичного віддалеміра:
 а – з постійним паралактичним кутом; б – з постійним базисом

Найпоширенішими є віддалеміри першого типу, постійний кут у яких утворюють промені візування, що проходять через віддалемірні риски та вузлову точку об'єктива зорової труби геодезичного приладу. Як віддалемірні використовують дві горизонтальні риски x та y , розташовані симетрично щодо перехрестя головних ниток у зорових трубах геодезичних приладів (теодолітів, нівелірів) (рис. 36). У комплект ниткового віддалеміра, крім труби зі сіткою ниток, входить рейка із сантиметровими поділками. Рейку встановлюють вертикально над точкою, до якої вимірюють віддаль.

Нехай у точці А встановлено прилад, а в точці В – рейку зі сантиметровими поділками (рис. 36). Промені від ока проходять через окуляр і сітку ниток паралельно візирній осі зорової труби до об'єктива, де заломлюються і далі перегинаються у передньому фокусі об'єктива F , утворюючи постійний кут β . Проектуючись на рейку, ці промені обмежують відрізок MN , який відповідає базису b . Позначивши відстань від осі обертання приладу до центру об'єктива величиною g , фокусну відстань об'єктива – f і відстань

від переднього фокуса до рейки як q , шукану віддаль D знайдемо за формулою:

$$D = q + g + f. \quad (6.7)$$

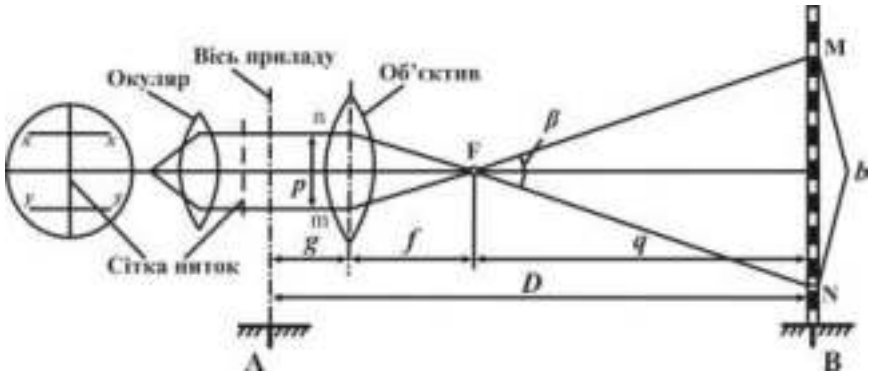


Рис. 36. Схема визначення відстані оптичним віддалеміром

Із подібності трикутників FMN і Fmn видно, що $q / b = f / p$, звідки $q = f / p \cdot b$, де p – віддаль між віддалемірними рисками. Якщо відношення f/p позначити через k і взяти до уваги, що $g + f$ є постійною величиною приладу c , то

$$D = k \cdot b + c. \quad (6.8)$$

Оскільки f і p мають сталі значення, то величина k також стала для даного приладу, і називають її *коефіцієнтом ниткового віддалеміра*. Для зручності обчислення відстаней величини f і p у приладах підібрані таким чином, щоб $k = 100$. Величина c у зорових трубах із зовнішнім фокусуванням сягає 0,6 м, тому її необхідно враховувати під час великомасштабних зйомок (1:500; 1:1000; 1:2000). Для труб із внутрішнім фокусуванням вона здебільшого не перевищує 4 см, і нею можна знехтувати. У цьому разі

$$D = k \cdot b = 100 \cdot b. \quad (6.9)$$

Під час вимірювання відстаней нитковим віддалеміром величину змінного базису знаходять як різницю відліків на рейці, взятих по верхній xx і нижній yy віддалемірних нитках (рис. 37). Для того, щоб промінь візування проходив паралельно місцевості, велику горизонтальну нитку зорової труби наводять на висоту, рівну висоті приладу i , яку вимірюють за допомогою рейки або рулетки. Точність вимірювання відстаней оптичним віддалеміром порівняно невелика, що зумовлено впливом на результати вимірювання несприятливих зовнішніх умов, неточністю відліків по рейці, великою товщиною рисок тощо.

Електрофізичні віддалеміри. До цієї групи приладів належать світло-, радіо- та лазерні віддалеміри, які працюють за принципом вимірювання часу проходження електромагнітними хвилями відстаней від генератора випромінювання до відбивача і назад. Комплект віддалеміра складається із передавально-приймального пристрою, встановленого на першій точці, і відбивача хвиль, розміщеного на кінцевій точці.

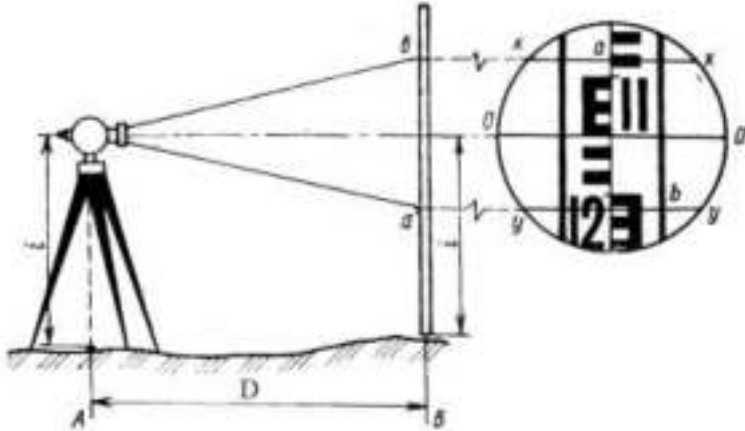


Рис. 37. Оптичний віддалемір і поле зору його труби

Якщо позначити швидкість поширення електромагнітних хвиль через v , а час проходження ними прямої та зворотної відстані через t , то отримаємо формулу для знаходження відстані:

$$D = v \cdot t / 2 \quad (6.10)$$

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює 299 792 456 м/с, а в повітрі може бути визначена з урахуванням показника заломлення повітря, який залежить від температури, тиску і вологості середовища. Тому

$$D = c \cdot t / 2 \cdot n, \quad (6.11)$$

де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі; n – показник заломлення повітря, залежний від довжини хвилі та стану атмосфери.

Для визначення часу t застосовують два методи – імпульсний і фазовий. Імпульсний метод використовують у приладах для вимірювання великих відстаней, але з малою точністю. Імпульсний віддалемір працює таким чином. Прилад випромінює електромагнітний імпульс (радіо- або світловий) у напрямку відбивача. Після відбивання імпульс повертається до приладу, приймальний пристрій якого обладнаний чутливим елементом для реєстрації

хвиль і модулем для перетворення сигналу у форму, зручну для вимірювання. У момент надсилання імпульсу на відбивач починає працювати лічильник часу, а в момент повернення імпульсу з дистанції відлік часу припиняється, і на індикаторі фіксується загальний час проходження шляху до точки і назад.

У геодезії більшого поширення набули фазові віддалеміри, які мають високу точність вимірювання. Передавальний елемент такого віддалеміра випромінює модульований за амплітудою світловий промінь певної частоти. Після відбиття електромагнітна хвиля фіксується приймачем приладу, який порівнює фази вихідного та відбитого сигналів. Час t проходження електромагнітними хвилями прямого та зворотного шляху визначається через кількість модульованих хвиль, які вклалися у подвійну відстань. Якщо вклалося $N + \Delta N$ хвиль (де N – ціле число періодів коливань або фазових циклів, а ΔN – дробове), то за довжини модульованої хвилі λ час розраховують за формулою

$$t = (N + \Delta N) \lambda / f, \quad (6.12)$$

де $f = c / \lambda$ – частота модуляції.

Відстань, яку вимірюють, дорівнює

$$D = c / 2fn (N + \Delta N). \quad (6.13)$$

Оскільки на одній і тій самій частоті модуляції можна визначити лише величину ΔN , а кількість циклів N залишається невідомою, то рівність (6.12) не має конкретного розв'язку. Використовуючи результати вимірювання величини ΔN для кількох частот модуляції, розв'язують систему рівнянь, з яких і визначають відстань. У сучасних світловіддалемірах таку функцію виконує електронний пристрій приладу.

На практиці топографічних робіт набули поширення *світловіддалеміри* марок 2СМ-2, СМ-3, СМ-5, С-1М, СТ-10. Фазовий світловіддалемір 2СМ-2 має фіксовані частоти модуляції та призначений для вимірювання відстані до 2 000 м. Високий рівень автоматизації, просте управління і малі габарити має прилад СМ-3. Ним можна вимірювати відстані від 2 до 1 600 м. Прилад використовує напівпровідниковий арсенід-галієвий світлодіодний лазер, який працює в інфрачервоному діапазоні спектра. Світловіддалемір С-1М (виробництва ЦКБ “Арсенал”, Україна) призначений для вимірювання відстані у гірничих виробках та польових умовах. Обладнаний лімбами для вимірювання кутів з невеликою точністю: горизонтальних – 10 мінут, вертикальних – 1 градус. Діапазон вимірювання: 5 – 5 000 м з точністю $\pm (5 + 5 \cdot 10^{-6}D)$ мм. Відстані від 2 до 10 000 м дає змогу вимірювати прилад СТ-10 з похибкою $\pm (5 + 3 \cdot 10^{-6}D)$ мм. Точність світловіддалемірів

визначають на спеціальних контрольних базисах – лініях, довжина яких відома.

Радіовіддалеміри працюють у сантиметровому діапазоні ультракоротких радіохвиль. На відміну від світловіддалемірів, їх можна використовувати у будь-яку погоду (крім сильних дощів), у будь-який час доби і на відстані понад 150 км. Функції відбивача виконують станції, аналогічні випромінюючій, тобто активні ретранслятори замість пасивних, як у світловіддалемірах. В останніх моделях передавальні та ретранслюючі станції є взаємозамінними, що значно підвищує можливості радіовіддалемірів і дає змогу визначати відстані від 0,2 до 30 км. У геодезичних роботах радіовіддалеміри використовують під час топографічного знімання шельфу, великих водосховищ і озер.

За допомогою світловіддалемірів можна вимірювати відстані між двома точками, які лежать у межах прямої видимості. Тому дальність їхньої дії на земній поверхні обмежена через кривизну Землі. Радіохвилі здатні огинати перешкоди та земну поверхню і, відповідно, діапазон їхньої дії значно більший.

Швидко, точно й без сторонньої допомоги дають змогу вимірювати відстані ручні *лазерні (електронні) рулетки (віддалеміри)*. Лазерні рулетки – це малогабаритний технічний пристрій, оснащений LCD дисплеєм, клавіатурою, обчислювальним пристроєм і лазером (рис. 38). Вузькоспрямований промінь лазера дає змогу вимірювати відстані до невеликих об'єктів (0,6–6 см) у межах від 0,05 до 200 м з точністю від ± 1 мм до ± 2 мм. Прилад випромінює сигнал у червоному спектрі видимого діапазону, завдяки чому добре видно точку наведення на предметі, до якого вимірюють відстань. Завдяки технології Power Range™ можна виконувати вимірювання відстані до 100 м без візирних пластин. Вночі у сутінках або коли об'єкт у тіні, дальність вимірювання без використання візирної пластини може бути більшою. Щоб збільшити дальність вимірювання вдень або коли поверхня об'єкта, до якого вимірюють відстань, має незадовільну відбивну здатність, рекомендують використовувати візирну пластину. Вимірювання можуть бути помилковими, якщо їх виконують до прозорих повер-



Рис. 38. Лазерний віддалемір

хонь (вода, незадимлене скло тощо) або до глянцевих поверхонь.

Сучасне покоління лазерних рулеток має вбудований оптичний візир із двократним збільшенням або цифровий з потрібним (в окремих моделях і чотирикратним) збільшенням, що покращує візування на віддалені об'єкти. Пристрої мають також вмонтований бульбашковий рівень, який допомагає встановлювати його у горизонтальне положення, а останні моделі обладнанні ще й датчиком кута нахилу.

Лазерні рулетки мають вмонтовану пам'ять, а також інтегровані тригонометричні функції, які дають змогу визначати, наприклад, розміри вікон на фасадах будівель і кути нахилу покрівлі. Використовуючи алгоритм теореми Піфагора, прилад може обчислювати відстані за двома і трьома точками, а також висоти за трьома точками. У меню приладу є функції збереження констант, виклик константи із пам'яті, зміна значення виміру, таймер, додавання та віднімання результатів, а також спеціальні функції – обчислення площ, об'ємів тощо. Технології Bluetooth і DISTO™ дають змогу передавати результати вимірювань у форматі Excel®, AutoCAD® та інших програмних продуктів у Pocket PC або ноутбук.

6.5. Визначення горизонтальних проекцій ліній місцевості

Під час вимірювання відстані мірними стрічками, рулетками й оптичними віддалемірами між двома точками місцевості знаходять зазвичай її значення на похилій поверхні (рис. 39). Однак для складання карт і планів треба знати *горизонтальне прокладення лінії*, яке відповідає довжині проекції лінії місцевості на горизонтальну площину. Горизонтальне прокладення лінії d завжди менше відстані D на поверхні Землі на величину ΔD (рис. 39).

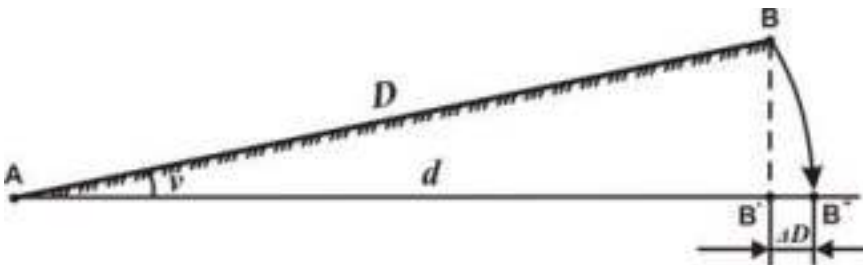


Рис. 39. Поправка за нахил лінії

Цю величину називають поправкою за нахил лінії місцевості до горизонту і розраховують за формулою

$$\Delta D = D - d = D - D \cos \nu = 2 D \sin^2(\nu/2). \quad (6.14)$$

Для різних відстаней і кутів нахилу місцевості складено таблиці цієї поправки. Якщо кут нахилу малий (до 2°), то і поправка незначна. Поправку за нахил враховують у тих випадках, коли у масштабі зйомки вона перевищує графічну точність. Наприклад, поправку значенням 1 м треба враховувати для зйомки масштабу більше 1:10 000 (у цьому масштабі вона виразиться величиною 0,1 мм).

Під час топографічних робіт горизонтальне прокладення лінії часто розраховують із прямокутного трикутника ABV' за формулою

$$d = D \cdot \cos v. \quad (6.15)$$

Якщо на різних частинах лінії кути нахилу неоднакові, то слід вимірювати довжину окремих відрізків цієї лінії і кути нахилу цих відрізків. За формулою (6.14) знаходять горизонтальні проекції кожного з відрізків, а потім їх на суму, яка і буде горизонтальною проекцією всієї лінії. Якщо нахили місцевості незначні, то горизонтальні проекції лінії можна отримати безпосередньо за допомогою стрічки. Для цього стрічку утримують горизонтально, піднімаючи початок або кінець стрічки над землею і проєктуючи його за допомогою виска (або вертикально встановленої віхи) на землю.

Для визначення горизонтального прокладення за вимірами оптичного віддалеміра також треба мати кут схилу. Якщо фізична поверхня похила, то візирний промінь приладу не буде перпендикулярним до рейки, встановленої вертикально у точці В (рис. 40).

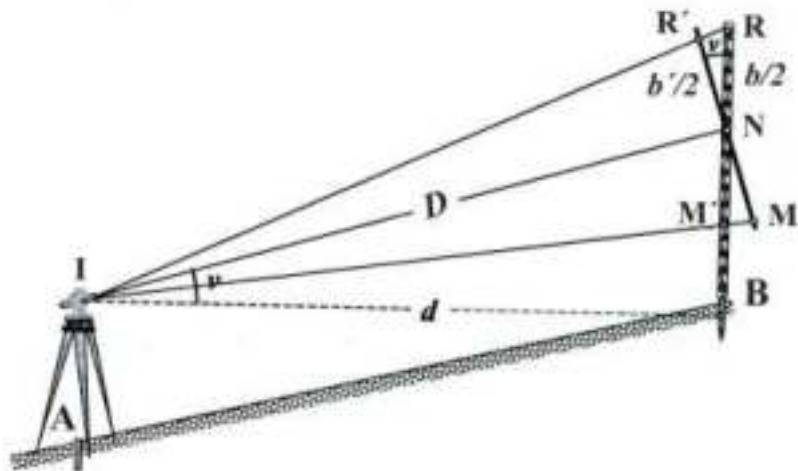


Рис. 40. Визначення горизонтального прокладення лінії за похилого променя візування оптичного віддалеміра

Відповідно до теорії віддалеміра рейку з положення NR треба поставити в положення NR', тобто нахилити на кут ν (кут ν у точці I дорівнює кутіві в точці N, як кути із взаємно перпендикулярними сторонами). Вважатимемо трикутник NR'R прямокутним. Тоді з цього трикутника можна записати: $b'/2 = b/2 \cdot \cos \nu$ або $b' = b \cdot \cos \nu$. Виміряну оптичним віддалеміром відстань D визначимо як $D = 100 \cdot b' = 100 \cdot b \cdot \cos \nu$. Враховуючи, що горизонтальне прокладення d визначаємо із трикутника INB, отримуємо:

$$d = D \cdot \cos \nu = 100 \cdot b \cdot \cos^2 \nu. \quad (6.16)$$

Таким чином, щоб визначити горизонтальне прокладення лінії, вимірної стрічкою або рулеткою, треба визначену відстань помножити на $\cos \nu$, а якщо похилу лінію вимірюють нитковим віддалеміром, то виміряну віддаль множать на $\cos^2 \nu$.

7. КУТОВІ ВИМІРЮВАННЯ У ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБОТАХ

Кутові вимірювання виконують для визначення куткових залежностей у розташуванні об'єктів і точок місцевості. Для побудови карт і планів використовують не самі кути між лініями (напрямами), а їхні проекції на горизонтальну та вертикальну площини. У горизонтальній площині знаходять величину кута між двома лініями напрямків, а у вертикальній – кут нахилу лінії візування та (або) денної поверхні у створі лінії.

7.1. Принцип вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів

Нехай на місцевості вибрали три точки A, B, C, розташовані на різних висотах (рис. 41). Перебуваючи у точці B, треба виміряти кут між напрямками BA і BC. Лінії цих напрямків лежать у похилій площині, яка проходить через точки A, B і C, і утворюють певний кут β' , відмінний від горизонтального. Щоб мати ортогональну проекцію цього кута, треба через сторони BA і BC провести прямовисні площини P_1 і P_2 . Перетин цих площин із горизонтальною площиною Q дасть горизонтальний кут β між проекціями ba і bc , який відповідає горизонтальному кутіві між напрямками BA і BC та підлягає вимірюванню. Цей кут є також мірою двогранного кута, утвореного вертикальними площинами P_1 і P_2 , які проходять відповідно через сторони BA і BC кута на місцевості. Звідси випливає, що горизонтальному кутіві β буде дорівнювати будь-який інший кут, вершина якого розташована у довільній точці прямовисного ребра $b'b$ двогранного кута ABC, а сторони лежать у площинах P_1 і P_2 .

Для вимірювання кута β у точці b' поміщають горизонтально розміщений градуйований круг, центр якого лежить на прямовисному ребрі $b'B$. Сторони двогранного кута, перетинаючи градуйований круг, намітять на ньому дугу $a'c'$, яка і є мірою горизонтального кута.

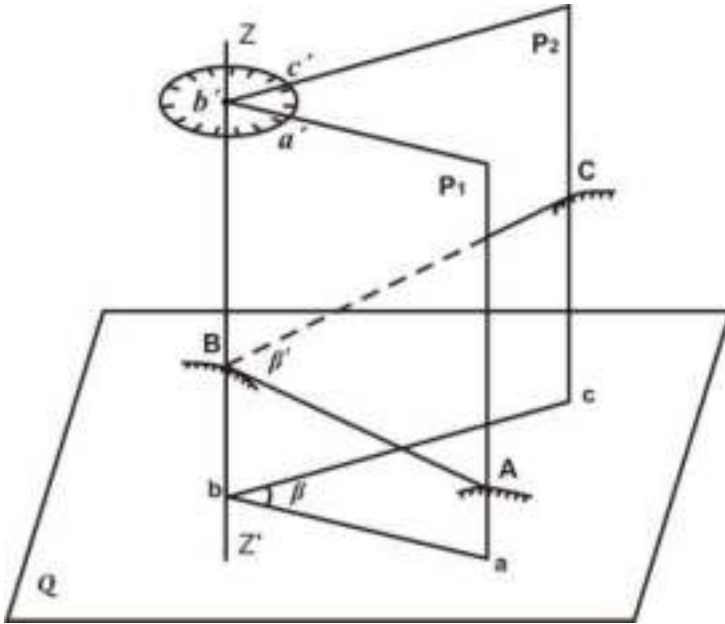


Рис. 41. Принципова схема вимірювання горизонтального кута

Отже, для вимірювання горизонтальних кутів прилад повинен мати у своїй конструкції градуйований горизонтальний круг, який називають **лімбом**, і рухоми вертикальну площину, яка б оберталася навколо прямовисної осі ZZ – осі приладу (рис. 42). “Лімб” у перекладі з латинської означає “смуга”. У вигляді смуги на периферії лімба нанесено шкалу градусних поділок, які для горизонтального круга підписані від 0° до 360° завжди за ходом годинникової стрілки. Рухоми вертикальну площину називають **візирною** (або **колімаційною**). Для її побудови використовують зорову трубу приладу, яка, повертаючись навколо власної горизонтальної осі NN_1 , описує вертикальну площину. Зорову трубу за допомогою її підставок скріплюють з іншим кругом, який повертається навколо вертикальної осі ZZ . Цей круг називають **алідадою**, що в перекладі з грецької означає “лінійка”. Повертаючи алідаду в горизонтальній площині (лімб нерухомий), послідовно суміщають колімаційну площину зі сторонами двогранного кута і

фіксують на лімбі початок та кінець дуги $a'c'$. Елемент, за допомогою якого здійснюють фіксування, називають **відліковим пристроєм**. Найпростіший – це штрих на алідаді, що займає певне положення між градусними поділками лімба. Він дає змогу брати по лімбу відліки у точках a' і c' . Під **відліком** розуміють дугу між нульовим штрихом шкали лімба та штрихом алідади, який проектується на шкалу лімба, виміряну в кутових одиницях. Оскільки лімб оцифрований за ходом годинникової стрілки, то горизонтальний кут β визначають як різницю цих відліків, тобто

$$\beta = a' - c'. \quad (7.1)$$

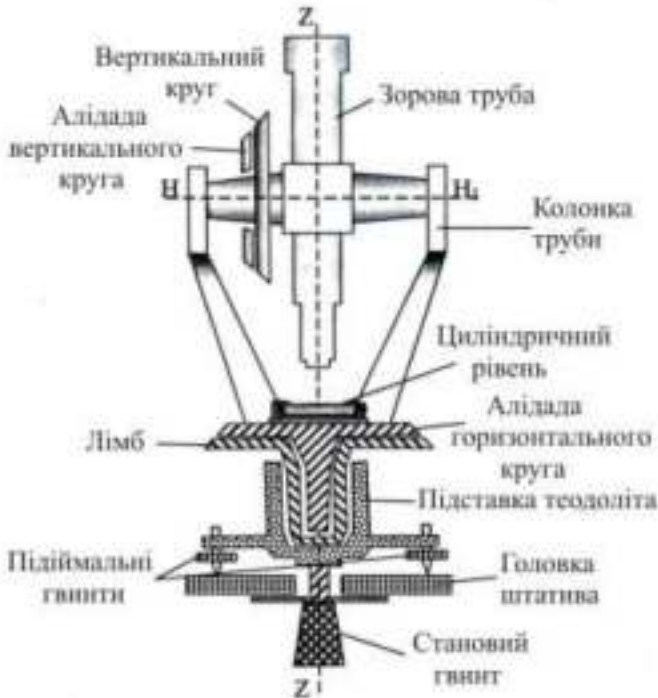


Рис. 42. Схема будови теодоліта

Вертикальні кути напрямів на точки візування лежать у вертикальній площині P_1 (рис. 43). Під вертикальним кутом у геодезії розуміють **кут нахилу** ν між похилою лінією BA та її проекцією ba (Ba_1) на горизонтальну площину або кут z між BA і прямовисною лінією ZZ' , який називають **зенітною відстанню**. Сума цих кутів дорівнює 90° . Якщо точка A вище B , то кут нахилу буде додатним, і навпаки. Величина кута не зміниться, якщо трикутник BAa_1 перемістити паралельно самому собі уздовж прямовисної лінії у положення $b_1A_1a_2$, тобто підняти його на рівень

зорової труби приладу. Якщо у площині P_1 помістити кутомірний круг із центром у точці b_1 , то можна виміряти вертикальний кут нахилу лінії b_1A_1 , який дорівнює значенню кута нахилу напрямку ВА на місцевості за умови, що $Vb_1=a_1a_2$. Припустимо, що лінія b_1A_1 може обернутися у площині P_1 навколо горизонтальної осі HH_1 , яка перетинає під прямим кутом прямовисну лінію b_1V у точці b_1 і перпендикулярна до площини P_1 .

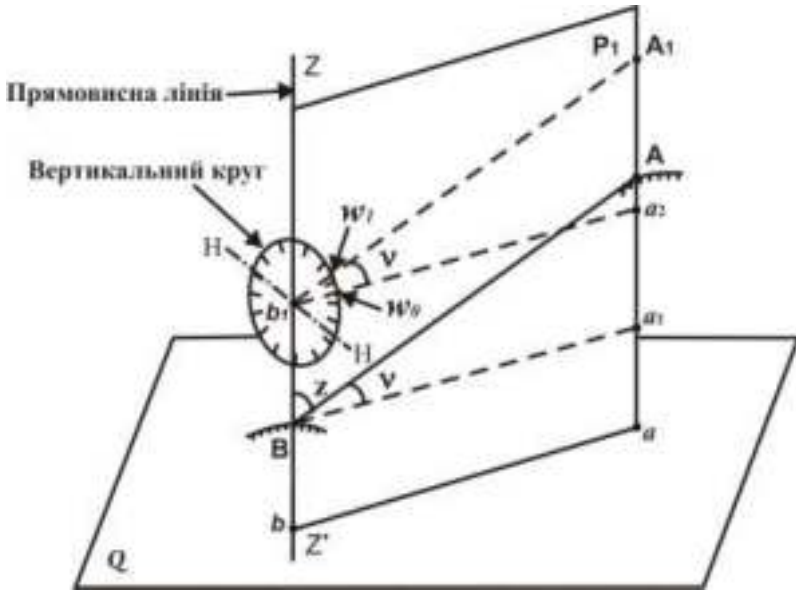


Рис. 43. Принципова схема вимірювання кута нахилу

Це припущення дає змогу вимірювати кути нахилу різних напрямків у площині P_1 . Якщо відлік по вертикальному кутомірному кругу при візуванні на точку A_1 дорівнює w_1 , а горизонтальному положенню лінії відповідає відлік w_0 , то кут нахилу лінії напрямку визначають як

$$v = w_1 - w_0. \quad (7.2)$$

Описаний геометричний принцип вимірювання кутів реалізовано у кутомірному приладі – *теодоліті*. Інструменти цього типу використовують для розгортання державної геодезичної мережі, для прокладання теодолітних ходів опорної знімальної сітки, а також для знімальних ділянок місцевості.

За конструктивними особливостями будови теодоліти бувають:

- *механічні* – мають металеві горизонтальні та вертикальні вимірювальні круги;

▪ *оптичні* – зі скляними кругами. Нанесення штрихів на прозоре скло дає змогу за допомогою лінз і призм передавати зображення цих штрихів у поле зору відлікових пристроїв;

▪ *кодові*, градусні вимірювальні круги яких також скляні, а кругові шкали таких теодолітів замінені кодовими знаками, що дає змогу автоматизувати процес вимірювання кутів.

Найважливішою характеристикою теодолітів є точність. Теодоліти за точністю поділяють на три класи:

- високоточні (можна вимірювати горизонтальний кут одним прийомом з точністю до 1,0 секунди);
- точні (до 10,0 секунд);
- технічні (до 30 секунд).

За призначенням серед кутомірних приладів розрізняють:

1. Теодоліти, призначені для вимірювання горизонтальних кутів. Вертикальні круги таких приладів мають або значно меншу точність порівняно з горизонтальними, або їх немає зовсім.

2. Вертикальні круги – для вимірювання вертикальних кутів. Горизонтальні круги таких приладів мають невелику точність. Використовують вертикальні круги тільки в астрономічних спостереженнях.

3. Теодоліти-тахеометри – мають однакову точність горизонтального та вертикального кругів, їхні зорові труби переводяться через зеніт і обладнані пристроями для визначення відстані. Тахеометри широко використовують у топографічних і геодезичних роботах.

4. Гіртеодоліти – слугують для визначення на місцевості напрямку істинного меридіана й азимутів наземних об'єктів.

5. Електронні тахеометри – автоматизовані оптико-електронні прилади, які використовують програмне забезпечення і дають змогу вимірювати горизонтальні та вертикальні кути, й віддалі, а також обчислювати просторові координати точок.

7.2. Порядок вимірювання горизонтальних кутів

Для вимірювання горизонтальних кутів теодоліт встановлюють у точці стояння В та готують до роботи (рис. 44). Точки А і С на місцевості позначають кілочками, а напрямки сторін ВА і ВС кута АВС – віхами, встановленими біля кілочків. Віхи допомагають швидше знайти потрібний напрямок зоровою трубою приладу. Горизонтальні кути під час топографо-геодезичних робіт вимірюють *способом прийомів* для визначення поодинокого кута і *способом кругових прийомів* для знаходження кутів між трьома й більше напрямками.

Спосіб прийомів складається із двох рівноцінних напівприймів, виконаних у двох положеннях вертикального круга щодо зорової труби теодоліта: круга ліворуч від труби (КЛ) та круга праворуч (КП). Вимірювання зазвичай починають у положенні КЛ. Зафіксувавши лімб горизонтального круга, наводять спочатку зорову трубу теодоліта у напрямку точки А, яка розташована правіше (задня точка). Закріплюють алідаду і за допомогою навідного гвинта системи “лімб-алідада” суміщають перехрестя сітки ниток із візирною ціллю, обертаючи гвинти за годинниковою стрілкою (закручуванням). За мікроскопом відлікового пристрою беруть відлік a_1 горизонтального круга. Послабивши закріпний гвинт алідади, обертають теодоліт за годинниковою стрілкою, візують зорову трубу приладу на ліву (передню) точку С та знімають відлік c_1 . Величину виміряного кута під час першого положення вертикального круга визначають як різницю відліків на задню та передню точки:

$$\beta_{кл} = a_1 - c_1. \quad (7.3)$$

Оскільки значення поділок горизонтального круга збільшуються за годинниковою стрілкою, то відлік на задню точку, як правило, більший ніж відлік на передню точку (рис. 44). Якщо нульова поділка лімба буде між напрямками на передню і задню точки, то відлік на передню точку буде номінально більшим ніж відлік на задню точку. Тоді в обчисленні значення кута треба до відліку на задню точку додати 360° і від цієї суми відняти відлік на передню точку. Із таких вимірювань складається перший напівприйом.

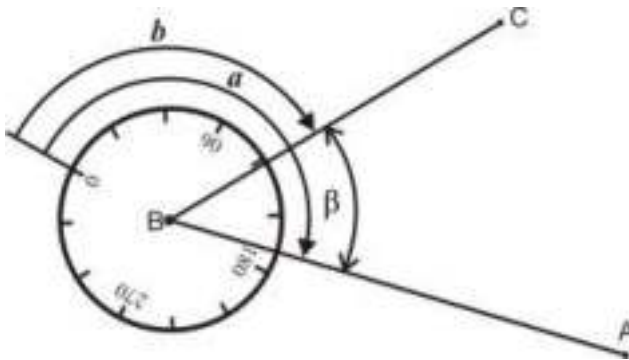


Рис. 44. Схема вимірювання горизонтального кута одним із напівприймів

Другий напівприйом виконують у тій же послідовності за положення КП. Для цього зорову трубу переводять через зеніт.

Крім того, рекомендовано у другому напівприйомі повертати алідаду проти ходу годинникової стрілки. Взявши відліки при КП на задню та передню точки, обчислюють значення кута $\beta_{кп}$

$$\beta_{кп} = a_2 - c_2. \quad (7.4)$$

Два вимірювання (напівприйоми) становлять повний прийом. Розбіжність результатів вимірювань не повинна перевищувати подвійної точності відлікового пристрою теодоліта, тобто

$$\beta_{кп} - \beta_{кл} \leq 2t. \quad (7.5)$$

Якщо розбіжність допустима, то знаходять середнє значення кута. Такий результат виключатиме колимаційну похибку і похибку за нахил осі обертання труби. Значення виміряних кутів під час кожного напівприйому і середнє значення кута обчислюють у точці перебування, поки не знято теодоліт.

Для зменшення впливу похибок вимірювань кута вимірюють n прийомами з перестановкою лімба через $180^\circ/n$, де n – кількість прийомів. Якщо передбачено вимірювання горизонтального кута тільки одним прийомом, то у другому напівприйомі лімб зміщують приблизно на $2-4^\circ$.

Під час вимірювання горизонтальних кутів способом кругових прийомів теодоліт встановлюють над точкою Т, а у пунктах 1, 2, 3 – візирні цілі (віхи) (рис. 45).

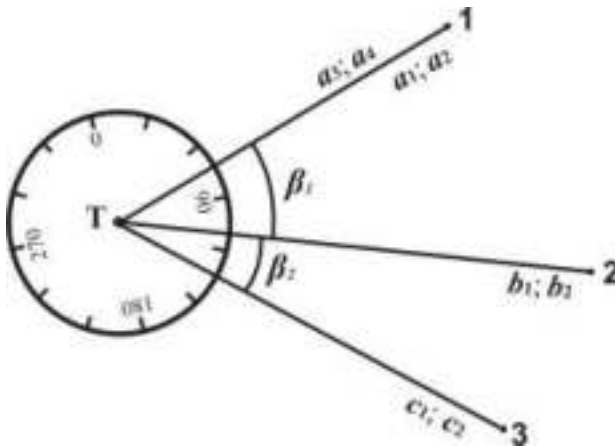


Рис. 45. Схема вимірювання кутів способом кругових прийомів

Наводять зорову трубу на початковий пункт 1, встановлюють тріхи більший за 0 відлік лімба та зчитують його (відлік a_1). Лімб залишають нерухомим, а алідаду обертають за ходом годинникової стрілки, послідовно наводячи трубу на пункти 2, 3 та знову на 1. Під час візування на кожен пункт знімають відліки b_1 , c_1 , a_2

відповідно. Повторне наведення на початковий пункт є контролем нерухомості лімба горизонтального круга під час виконання напівприйому. Відліки, зняті під час наведення на пункт 1 на початку та в кінці напівприйому мають збігатися у межах точності візування та знімання відліків. Якщо розходження перевищує допустиме значення, то напівприйом повторюють.

Другий напівприйом починають із наведення зорової труби на початковий пункт після переведення труби через зеніт (КП). Далі візують послідовно на інші пункти, повертаючи алідаду проти ходу годинникової стрілки. Під час кожного наведення знімають відліки a_3, c_2, ν_2, a_4 .

Як бачимо, на початковий напрямок маємо чотири відліки, на інші – по два. Знайдемо середнє значення відліків кожного напрямку:

$$\begin{aligned} a_{сер} &= (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - 360^\circ) / 4; \\ \nu_{сер} &= (\nu_1 + \nu_2 - 180^\circ) / 2; \\ c_{сер} &= (c_1 + c_2 - 180^\circ) / 2. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Приймемо перший напрямок за найточніший і початковий та до нього приведемо інші напрямки. Для цього від усіх напрямків віднімемо $a_{сер}$. Значення приведених напрямків дорівнюватимуть

$$a_{np} = a_{сер} - a_{сер} = 0; \quad \nu_{np} = \nu_{сер} - a_{сер}; \quad c_{np} = c_{сер} - a_{сер}. \quad (7.7)$$

Відповідно кути між напрямками розраховують як

$$\beta_1 = \nu_{np} - a_{np}; \quad \beta_2 = c_{np} - \nu_{np}. \quad (7.8)$$

Щоб зменшити вплив похибок, вимірювання виконують кількома прийомами, з перестановкою лімба між прийомами на $180^\circ/n$, де n – кількість прийомів.

7.3. Порядок вимірювання вертикальних кутів (кутів нахилу)

Принцип вимірювання кутів нахилу, як показано вище, полягає у визначенні кута між напрямком на точку візування та його горизонтальною проекцією. Для знаходження кута нахилу використовують вертикальний круг теодоліта. Лімба вертикального круга наглухо скріплений з віссю зорової труби й обертається разом із нею. Алідада вертикального круга також розміщена на осі обертання труби, але не скріплена з нею і під час обертання труби залишається нерухомою. Теодоліти-тахеометри мають дві системи написів поділок вертикального круга. За першої системи написів лімба оцифрований за ходом годинникової стрілки від 0 до 360° (рис. 46). У сучасних моделях технічних теодолітів використовують також іншу – секторну систему підписів поділок шкали вертикального круга. Вертикальний круг розділено на чотири сектори з градусними поділками, відліки за якими змінюються в межах

сектора від 0° до $\pm 75^\circ$. Підписи поділок додатні, якщо відліки збільшуються за ходом годинникової стрілки, і від'ємні, якщо відліки збільшуються проти ходу годинникової стрілки. У секторі від діаметра $90^\circ - 90^\circ$ до відліків -75° і $+75^\circ$ градусні поділки не підписані.

Під час знаходження вертикальних кутів має бути дотримана така умова: якщо візирна вісь зорової труби і вісь рівня біля алідади горизонтального круга горизонтальні, то нульові поділки алідади мають збігатися з нульовими поділками вертикального круга. Насправді ця умова порушується, тобто при перебуванні бульбашки рівня у нуль-пункті відлік за вертикальним кругом не дорівнює нулю, що вносить похибку у величину кута, виміряного за одного положення круга (рис. 46, 47). Для знаходження дійсного кута нахилу визначають величину, яку називають *місцем нуля (M0)*. *Місце нуля* – це відлік за вертикальним кругом, коли візирна вісь зорової труби горизонтальна, а бульбашка біля алідади перебуває в нуль-пункті.

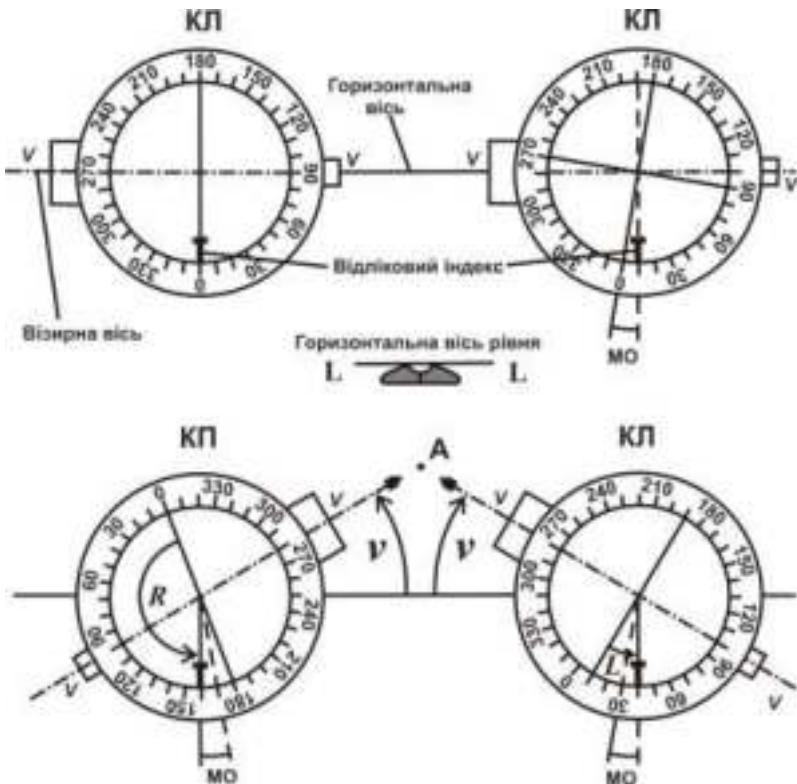


Рис. 46. Схема визначення кута нахилу за кругової шкали лімба

Визначення місця нуля та кутів нахилу залежить від схеми підписів поділок лімба вертикального круга. Розглянемо спочатку спосіб їхнього визначення для випадку, коли лімб вертикального круга має систему написів поділок від 0 до 360°.

Можливий випадок, що вісь зорової труби і вісь циліндричного рівня паралельні, а відлік за вертикальним кругом дорівнює нулю. Тоді, відповідно, і місце нуля $M_0 = 0^\circ$. Але вертикальний круг, який жорстко скріплений із зоровою трубою, може бути трохи повернутий у вертикальній площині щодо непорушного відлікового індексу, і тоді M_0 набуває певного значення.

Якщо відома величина M_0 , то для знаходження значення кута нахилу достатньо одного візування на точку А у положенні КЛ і одного відліку (L) за вертикальним кругом. Кут нахилу ν можна обчислити за формулою:

$$\nu = L - M_0. \quad (7.9)$$

Для контролю й отримання значення M_0 , яке може змінювати свою величину з різних причин, виконують два візування на потрібний напрямок, а саме у положеннях КЛ і КП, та беруть два відліки (L та R відповідно) за вертикальним кругом. Тоді, згідно з рис. 46, можна записати вираз для обчислення кута нахилу з вимірів при КП:

$$\nu = M_0 - R \pm 180. \quad (7.10)$$

Додавши рівняння (7.9) до рівняння (7.10), отримаємо: $2\nu = L - M_0 + M_0 - R \pm 180$. Звідси

$$\nu = (L - R \pm 180)/2. \quad (7.11)$$

Якщо від рівняння (7.9) відняти (7.10), одержимо $0 = L - M_0 - M_0 + R \pm 180$. Або

$$M_0 = (L + R \pm 180)/2. \quad (7.12)$$

Для приладів, які мають секторну систему написів вертикального круга, формули розрахунку місця нуля та вертикального кута трохи відрізняються. Відповідно до рис. 47 можна записати:

$$\nu = L - M_0; \quad (7.13)$$

$$\nu = M_0 - R. \quad (7.14)$$

Додавши рівняння (7.13) до рівняння (7.14), отримаємо $2\nu = L - M_0 + M_0 - R = L - R$. Звідси

$$\nu = (L - R)/2. \quad (7.15)$$

Віднявши рівняння (7.13) від рівняння (7.12), одержимо $0 = L - M_0 - M_0 + R$, або $2M_0 = L + R$. Тоді

$$M_0 = (L + R)/2. \quad (7.16)$$

З формул (7.12) і (7.16) випливає, що для визначення M_0 треба послідовно у положеннях КЛ і КП навести зорову трубу на ту

саму точку, зняти відліки вертикального круга, а після цього знайти значення M_0 . Контролем точності вимірювання вертикальних кутів є незмінність місця нуля, яке не повинно відрізнитися від 0 більше як на подвійну точність штрихового мікроскопа. Якщо значення M_0 перевищує подвійну точність відлікового пристрою, то рекомендують виконати перевірку M_0 і за необхідності виправити його.

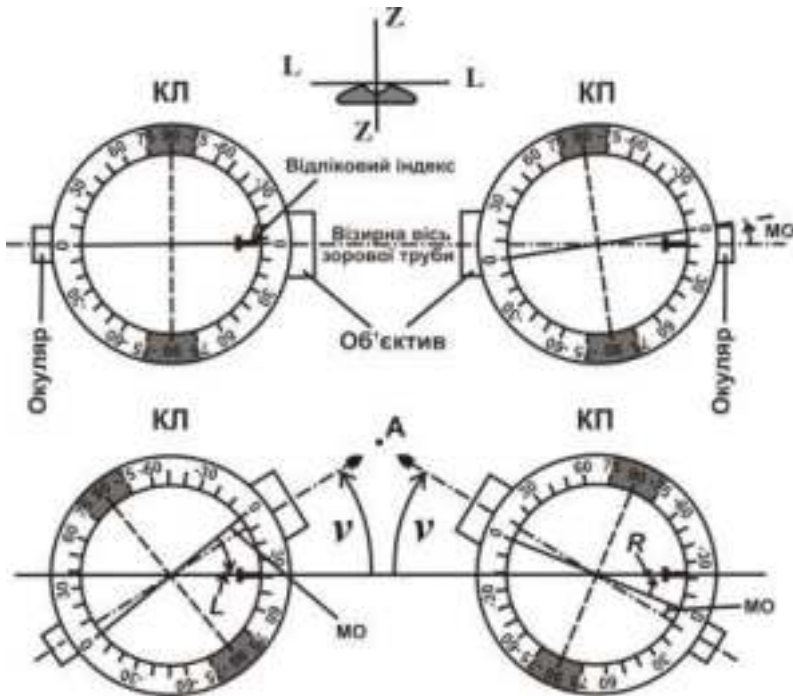


Рис. 47. Схема визначення кута нахилу за секторної шкали лімба

Незалежно від типу шкали вертикального круга вимірювання кута нахилу виконують у такій послідовності. Починають вимірювання при КЛ. Для цього послаблюють закріпні гвинти аліади горизонтального круга і зорової труби, візують на точку A . Затискають закріпні гвинти. Виставляють у нуль-пункт бульбашку рівня. Виконують точне суміщення центрального горизонтального штриха сітки ниток із точкою A . Це наведення здійснюють загвинчуванням навідного гвинта зорової труби (обертанням гвинта за ходом годинникової стрілки). Беруть відлік L за вертикальним кругом. Переводять трубу через зеніт, повторюють описані вище дії при положенні КП і беруть відлік R . Таке вимірювання кута нахилу називають вимірюванням повним прийомом за однією (середньою) ниткою.

8. ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕВИЩЕНЬ

Перевищення використовують для обчислення висот точок на поверхні Землі. Знання абсолютної висоти потрібне для вирішення наукових задач, пов'язаних із вимірюванням вертикальних рухів земної кори, при будівництві й експлуатації споруд, для відображення рельєфу на планах і картах. *Сукупність вимірювань на місцевості, в результаті яких визначають перевищення між точками місцевості з подальшим обчисленням їхніх висот щодо прийнятої вихідної поверхні, називають висотною зйомкою, або нівелюванням.*

Залежно від завдань і вимог до точності робіт, особливостей місцевості, метеорологічних умов застосовують різні види нівелювання:

- *геометричне* – перевищення визначають за горизонтальним променем візування нівеліра;
- *тригонометричне* – перевищення знаходять з вимірювань за похилим променем візування з використанням тригонометричних функцій;
- *барометричне*, в основу якого покладена залежність між значенням атмосферного тиску в певній точці місцевості й висотою цієї точки;
- *гідростатичне* – ґрунтується на властивості вільної поверхні рідини у з'єднаних посудинах встановлюватися на одному рівні, незалежно від виду і маси рідини та перерізу посудин;
- *автоматичне* – виконують за допомогою спеціального приладу (профілографа), який викреслює профіль пройденого шляху і дає змогу визначити відмітки окремих точок. Такий метод широко використовують під час перевірки стану профілю залізничних колій;
- *аерорадіонівелювання* – перевищення між точками визначають за результатами вимірювань висоти польоту радіовисотоміром або лазерним висотоміром;
- *супутникове* – визначення висот точок за допомогою супутникових радіонавігаційних систем.

Розглянемо детальніше ті види нівелювання, які найчастіше застосовують під час топографо-геодезичних робіт.

8.1. Геометричне нівелювання

З відомих методів нівелювання найбільш точним та поширеним під час геодезичних робіт є геометричне нівелювання. Суть геометричного нівелювання полягає у вимірюванні відстані

від певної рівневої поверхні до точок на фізичній поверхні Землі (рис. 48).

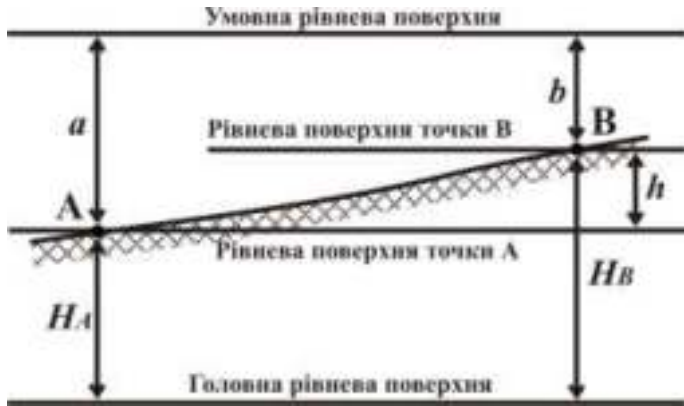


Рис. 48. Принципова схема геометричного нівелювання

Оскільки обмежені ділянки рівневої поверхні приймають за горизонтальну площину, то систему таких рівневих поверхонь можна схематично зобразити у вигляді горизонтальних паралельних прямих, а перевищення – перпендикулярним до них відрізком (рис. 48). Перевищення h визначають як різницю відрізків a і b , тобто відстаней від точок A і B на фізичній поверхні землі до умовної рівневої поверхні, яка проходить над цими точками.

Вимірявши різницю висот h , розраховують абсолютну висоту H_B точки B, що є сумою висоти H_A вихідної точки A та перевищення. Під час вимірювань на місцевості немає змоги прив'язуватися до головної рівневої поверхні (рівня моря), тому заздалегідь на великих територіях створюють державну висотну мережу. Якщо на місцевості немає пунктів з відомою абсолютною висотою, то висоти точок визначають від умовного рівня і називають їх умовними (відносними).

На практиці положення умовної рівневої поверхні задають горизонтальним променем наведення геодезичного приладу – *нівеліра*, а довжину відрізків a і b визначають за допомогою нівелірних рейок, які встановлюють вертикально в точках A і B. *Нівелір* – геодезичний прилад, призначений для побудови у просторі горизонтального променя (niveleer у перекладі з фр. означає “вирівнювати”). Різниця довжини відрізків рейок від землі до візирного променя дає шукане перевищення, тобто

$$h = a - b. \quad (8.1)$$

Рейку, встановлену в початковій точці з відомою висотою, називають *задньою*, а рейку, що стоїть спереду за ходом,

передньою. Тому кажуть, що під час геометричного нівелювання перевищення між двома точками дорівнює різниці між відліками на задній і передній рейках. Точки встановлення інструменту називаються *станціями*, точки встановлення рейок – *пíkетами*. Пíkети позначають на місцевості кílками, забитими врівень із поверхнею ґрунту, і сторожками.

Розрізняють два способи геометричного нівелювання: *від середини* і *вперед*. Під час нівелювання від середини нівелір встановлюють на однакових відстанях між точками А і В, а в самих точках встановлюють нівелірні рейки (рис. 49). Послідовно візують на рейки і беруть відліки: *a* – на задній рейці; *b* – на передній рейці. Як видно з рис. 49, перевищення точки В над точкою А дорівнює різниці між відліками на задній і передній рейках. Визначають його за формулою (8.1).

Перевищення буде додатним, якщо $a > b$, і від’ємним, якщо $a < b$. Тоді

$$H_B = H_A \pm h. \quad (8.2)$$



Рис. 49. Геометричне нівелювання способом від середини

Величина $H_A + a = H_B + b = ГП$, де *ГП* – горизонт приладу. Звідси

$$H_B = ГП - b. \quad (8.3)$$

Визначення висот точок за допомогою горизонту приладу зручно виконувати тоді, коли з однієї станції (точки стояння нівеліра) беруть відліки по рейках на кількох точках.

Під час нівелювання способом уперед нівелір встановлюють у точці А, відмітка якої H_A відома. У точці В прямокутно встановлюють рейку (рис. 50).



Рис. 50. Геометричне нівелювання способом уперед

За допомогою рулетки або рейки вимірюють висоту нівеліра i (від поверхні ґрунту до осі зорової труби). Беруть відлік b по рейці. Перевищення між точками розраховують як різницю висоти інструмента й відліку по рейці

$$h = i - b. \quad (8.4)$$

Висота передньої точки В буде дорівнювати:

$$H_B = H_A + h = H_A + i - b. \quad (8.5)$$

Величина $H_A + i$ – горизонт приладу. Тоді

$$H_B = \text{ГП} - b. \quad (8.6)$$

Спосіб нівелювання від середини має значні переваги над нівелюванням уперед, оскільки збільшується відстань між пікетами і компенсуються помилки відліків, які виникають через імовірне відхилення осі нівеліра від горизонтального положення.

Геометричне нівелювання, незалежно від способу його виконання, може бути *простим* і *послідовним*. Якщо визначають перевищення між двома точками місцевості одним встановленням нівеліра (з однієї станції), то таке нівелювання називають простим. Якщо нівелювання виконують з метою передачі відміток на значні відстані або з метою побудови профілю місцевості, то його здійснюють з кількох станцій і називають послідовним, або складним.

Під час послідовного нівелювання лінію АВ розбивають на частини, кожна з яких нівелюють з окремих станцій (рис. 51). Після встановлення нівеліра на станції І беруть відліки a_1 і b_1 на задній та передній рейках і визначають перевищення точки І щодо точки А.

Потім задню рейку з точки А переносять у точку 2, встановлюють нівелір на станцію II і, взявши відліки по рейках a_2 і b_2 , знаходять перевищення h_2 . Такий порядок роботи і на решті станцій. Під час послідовного нівелювання прокладають *нівелірний хід*, у якому точки 1, 2, 3 є спільними для двох суміжних станцій, і їх називають *сполучними*.

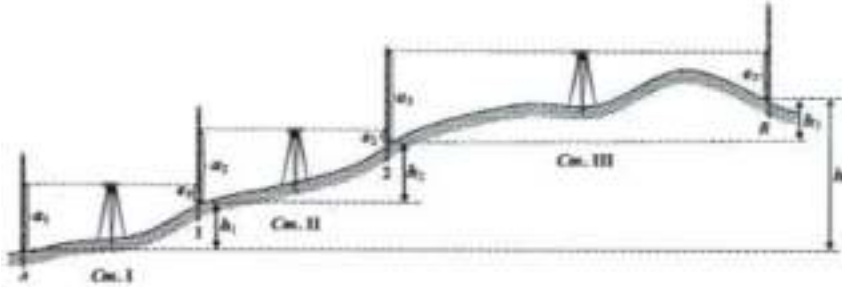


Рис. 51. Послідовність прокладання нівелірної ходи

Точки встановлення рейок, які розміщені між сполучними точками, називають *проміжними*; вони слугують переважно для знаходження відміток характерних точок рельєфу. Окремі перевищення між точками визначають за формулою (8.1): $h_1 = a_1 - b_1$; $h_2 = a_2 - b_2$; $h_n = a_n - b_n$.

Загальне перевищення між точками А і В дорівнюватиме алгебраїчній сумі перевищень

$$h = \sum_{i=1}^n h_i = \sum_{i=1}^n a_i - \sum_{i=1}^n b_i. \quad (8.7)$$

Після визначення перевищень між сполучними точками можна послідовно обчислити їхні відмітки: $H_1 = H_A + h_1$; $H_2 = H_1 + h_2$; $H_B = H_{n-1} + h_n$.

Для контролю нівелірні ходи роблять замкнутими, і тоді сума перевищень має дорівнювати 0 ($\sum h = 0$). Якщо хід розімкнутий, то нівелювання слід робити у прямому і зворотному напрямках. Сума перевищень прямого ходу має дорівнювати сумі перевищень зворотного ходу, але з протилежним знаком

$$\sum h_{пр} = -\sum h_{зв}. \quad (8.8)$$

Нівелювання на станції оптичним нівеліром виконують у такому порядку. Рейки встановлюють на точках, розташованих на відстані 100–200 м (на рівній місцевості). Посередині між рейками встановлюють нівелір. Відмітки по рейках беруть послідовно: 1) по чорній стороні задньої рейки; 2) по чорній стороні передньої рейки;

3) по червоній стороні передньої рейки; 4) по червоній стороні задньої рейки. Усі польові виміри та розрахунки записують у журнал встановленої форми.

8.2. Тригонометричне нівелювання

Цей метод вимірювання перевищень широко застосовують під час виконання планово-висотної (тахеометричної) зйомки місцевості, а також з метою визначення висот окремих точок. Тригонометричне нівелювання полягає в обчисленні перевищення між точками місцевості на основі розв'язку прямокутного трикутника, катети якого утворені відрізками рівневої поверхні точки А та прямою лінією, що проходить через точку В, а гіпотенуза – візирною віссю, яка паралельна поверхні схилю (рис. 52).

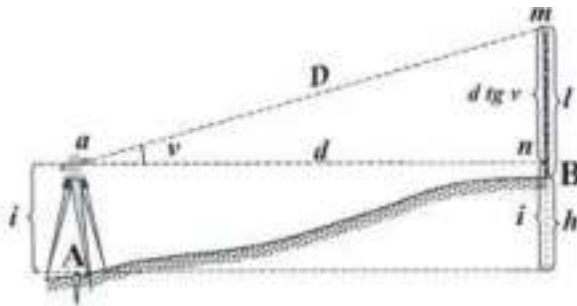


Рис. 52. Визначення перевищення методом тригонометричного нівелювання

У процесі тригонометричного нівелювання на місцевості вимірюють відстань D між точками А і В та кут нахилу v променя візування, який наводять на нівелірну рейку паралельно схилу. Відстань вимірюють землемірною стрічкою або віддалеміром, кут нахилу – геодезичним приладом, який оснащений кутомірним пристроєм із горизонтальною лінією відліку. Таким пристроєм є вертикальний круг тахеометра та інших приладів, призначених для вимірювання кутів нахилу.

З прямокутного трикутника amn за тригонометричними функціями визначають катет mn . Вимірявши відстань D , можна знайти mn : $mn = D \sin v$. Зважаючи на те, що за вимірами віддалі визначають горизонтальне прокладення лінії d , яке, використовуючи землемірну стрічку або рулетку, розраховують за формулою (6.14), то катет mn визначають також як $mn = d \operatorname{tg} v$. Щоб знайти перевищення точки, В треба ще виміряти рулеткою висоту приладу i та взяти відлік по рейці l . З геометричних умов рис. 52 можна записати:

$$h = mn + i - l = d \operatorname{tg} v + i - l. \quad (8.9)$$

Враховуючи, що промінь візування наводять на таку ж висоту по нівелірній рейці, як і висота приладу, знаходять кут v , який дорівнює кутів схилю, а $l = i$. Тоді вираз (8.9) спроститься до вигляду

$$h = d \operatorname{tg} v. \quad (8.10)$$

Під час знаходження перевищень точок, віддалених на відстань 300 м і більше, вводять поправку f за кривизну Землі та рефракцію променя візування. З урахуванням поправки повна формула тригонометричного нівелювання набуває вигляду

$$h = d \operatorname{tg} v + i - l + f. \quad (8.11)$$

Перевищення, обчислені за цією або попередньою формулами, заокруглюють до 0,01 м. Похибка вимірювання перевищень пов'язана, переважно, з помилкою вимірювання кутів нахилу. Для послаблення впливу рефракції тригонометричне нівелювання на великих відстанях доцільно виконувати через 2–3 години після сходу сонця і не пізніше 2–3 годин перед його заходом.

8.3. Барометричне нівелювання

В основі барометричного нівелювання лежить залежність між висотою точки та величиною атмосферного тиску на ній: чим вище точка над рівнем моря, тим тиск менший і навпаки. Проте атмосферний тиск і висота точки пов'язані складною математичною залежністю, на яку впливають різні зовнішні чинники: температура і вологість повітря, розташування точки на Земній кулі, стан атмосфери та багато інших, врахувати які можна тільки наближено. Цю залежність дослідники виражали у барометричних формулах. Найбільш строгою та поширеною є повна барометрична формула, яку в 1799 р. запропонував П.С. Лаплас:

$$h = 18404 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \cdot \left(1 + \gamma \frac{e}{P}\right) \cdot (1 + \beta \cos 2\varphi) \cdot \left(1 + \frac{2H}{R}\right) \cdot \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (8.12)$$

де h – шукане перевищення; $\alpha = 0,003665$ – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря; t, e, P, φ, H – відповідно середні значення температури повітря, парціального тиску водяної пари, атмосферного тиску, географічної широти і висоти над рівнем моря у точках, які нівелюють; P_1, P_2 – виміряні значення атмосферного тиску в цих точках; $\gamma = 0,377$; $\beta = 0,00265$ і $R = 6371$ – радіус Землі.

Відомі й інші повні барометричні формули Бауернфейнда, Гауса, Йордана, Рюльмана та інших. Повні барометричні формули використовують досить рідко, тому що вони громіздкі та незручні

для камеральних обчислень. Визначаючи різниці висот за результатами барометричного нівелювання, користуються скороченими барометричними формулами, на основі яких складено різні таблиці, номограми, графіки. Найчастіше використовують скорочену барометричну формулу Бабіне і наближену формулу Певцова, а для визначення перевищень – відповідно **спосіб баричних ступенів висот** і **спосіб наближених висот** (альтитуд). Перевищення способом баричних ступенів висот обчислюють за робочою формулою французького вченого Бабіне:

$$h = K(1 + \alpha t_{\text{сер}}) \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}, \quad (8.13)$$

де $K = 16\,000$ – стала величина; $\alpha = 0,0037$ – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря; $t_{\text{сер}}$ – середня температура повітря в точках вимірювання; P_1, P_2 – атмосферні тиски на першій і другій точках.

За формулою Бабіне складено таблиці баричних ступенів висот, в основі яких лежать аргументи $t_{\text{сер}} = ((t_1 + t_2)/2)$ і $V_{\text{сер}} = (V_1 + V_2)/2$. Тоді формула для визначення перевищень набуде вигляду

$$h = (P_1 - P_2) \cdot \Delta h, \quad (8.14)$$

де $\Delta h = K \frac{1 + \alpha \cdot t}{2P}$ – баричний ступінь висоти, який показує, на

скільки метрів підвищується місцевість з падінням атмосферного тиску на 1 мм рт. ст. (для середньої смуги Східної Європи баричний ступінь становить 10,5 м/мм). Користуючись спеціальними таблицями, за середнім тиском $V_{\text{сер}}$ і середньою температурою $t_{\text{сер}}$ знаходять величину Δh , а потім – перевищення h між точками.

Обчислення перевищень способом наближених висот виконують за робочою формулою М.В. Певцова з використанням таблиці наближених висот і таблиці поправок за температуру повітря. Наближена формула Певцова має вигляд

$$h = K_0(1 + \alpha \cdot t) \cdot \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (8.15)$$

де $K_0 = 18470$.

Робоча формула Певцова є такою:

$$h = (H'_2 - H'_1) + (H'_2 - H'_1) \cdot \alpha(t_m - t_0), \quad (8.16)$$

де H'_1 і H'_2 – наближені висоти (альтитуди); t_m – середнє значення температури повітря у точках; $t_0 = 15^\circ \text{C}$ – температура, для якої складено таблиці.

Для вимірювання атмосферного тиску застосовують пружинні та частково рідинні (ртутні) барометри. Оскільки на тиск суттєво впливає температура повітря, її вимірюють одночасно з тиском на станції за допомогою термометра-праща.

Цей метод застосовують під час розгортання висотної мережі для геодезичних, геологічних, геофізичних досліджень, коли не потрібна велика точність визначення висот, або у важкодоступних районах (у горах, на окремих островах тощо), де неможливо використати інші, точніші методи нівелювання. Головною перевагою барометричного нівелювання є те, що для його проведення не потрібно взаємної видимості між точками, а недоліком – порівняно мала точність. Однак за продуктивністю і вартістю робіт барометричне нівелювання ефективніше від тригонометричного втричі, а геометричного – у 16 разів. Теоретичні й експериментальні дослідження показали, що застосовувати цей метод нівелювання варто там, де треба визначити перевищення з похибкою 0,3–0,5 м.

8.4. Гідростатичне нівелювання

У сполучених посудинах вільна поверхня рідини встановлюється на однаковому рівні незалежно від поперечного перерізу посудин, маси рідини і перевищення. Цю властивість і покладено в основу будови гідростатичних нівелірів (рис. 53).

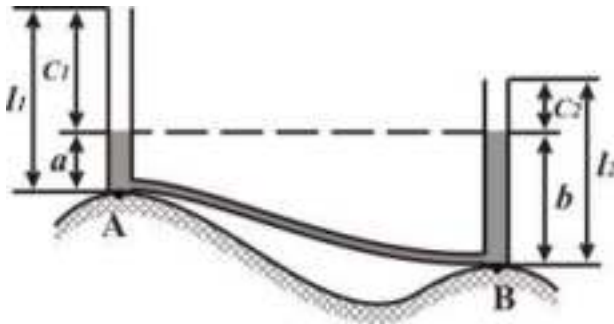


Рис. 53. Схема будови гідростатичного нівеліра

Якщо виміряти висоту стовпчиків рідини a і b у сполучених посудинах, то їхня різниця відповідатиме перевищенню h між точками А і В, на яких встановлені ці посудини, тобто $h = b - a$. Відмітки рівнів рідини c_1 і c_2 можна робити і від верху посудин. Вимірявши їхню висоту l_1 і l_2 , знайдемо перевищення:

$$h = b - a = (l_2 - c_2) - (l_1 - c_1) = (c_1 - c_2) + (l_2 - l_1). \quad (8.17)$$

Якщо взяти посудини однакової висоти ($l_2 = l_1$), то

$$h = (c_1 - c_2). \quad (8.18)$$

Гідростатичне нівелювання, яке було відоме ще у Стародавньому Єгипті, застосовують у будівельній справі для високоточної передачі висот на невеликі відстані, для вивчення вертикальних рухів земної поверхні та у спелеологічних дослідженнях. Сучасні конструкції гідростатичних нівелірів із шлангом завдовжки до 15 м дають змогу визначити перевищення між точками з точністю до десятих і навіть сотих часток міліметра.

Тема 9. СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ

Супутникова система навігації (Global Navigation Satellite System – GNSS) – це комплексна електронно-технічна система, яка складається із наземного та космічного устаткування для визначення місця розташування (географічних координат і висоти) та параметрів руху (швидкості, напрямку руху і т. д.) наземних, водних і повітряних об'єктів.

У наш час працюють або у стані розгортання такі системи супутникової навігації:

- **GPS.** Належить Міністерству оборони США. Цей факт, на думку спеціалістів деяких держав, є її головним недоліком. Пристрої, які підтримують навігацію по GPS, є найпоширенішими у світі. Також відома під ранньою назвою NAVSTAR (NAVigation Satellite providing Time And Range – навігаційна система визначення часу і місця розташування).

- **ГЛОНАСС.** Належить міністерству оборони Росії. Система, за заявами розробників наземного обладнання, матиме деякі технічні переваги порівняно з GPS. Після 1996 р. угруповання її супутників скорочувалось і до 2002 р. практично припинило функціонувати. Лише у кінці 2011 р. система була повністю відновлена. Відзначається мала поширеність клієнтського обладнання. До 2025 р. передбачена глибока модернізація системи.

- **Бейдоу.** Це підсистема GNSS, яку розгортає Китай і яка призначена для використання тільки у цій країні. Особливість – невелика кількість супутників, що перебувають на геостаціонарних орбітах. У планах до 2020 р. – збільшити кількість супутників до 35, щоб система могла працювати як глобальна. Реалізацію програми розпочато у 2000 р. Перший супутник вийшов на орбіту в 2007 р.

- **Galileo.** Європейська система, що перебуває на етапі формування супутникового угруповання, яке заплановано повністю розгорнути до 2020 р.

- **IRNSS.** Індійська навігаційна супутникова система у стані розробки. Заплановано використання тільки в цій країні. Перший супутник був запущений у 2008 р.

Глобальна система позиціонування (GPS – Global Positioning System)

Історична довідка. Систему GPS розроблено в 1973 р. Міністерством оборони США, щоб забезпечити визначення місця розташування, синхронізацію часу й отримання навігаційних сигналів американськими військовими та цивільними користувачами у всьому світі. Супроводження (навігація) військових об'єктів було головним завданням цієї системи. Проте дослідження, виконані вченими Массачусетського технологічного інституту у 1976–1978 роках, показали можливість застосування GPS у геодезії, тобто в задачах, де потрібна висока (міліметрова) точність визначення координат. З того часу коло задач, де знаходить застосування GPS, значно розширилося, ставши таким самим буденним явищем, як комп'ютер чи мобільний телефон. Зокрема, GPS інтегрується з ними в комплексні високоінтелектуальні прилади.

Система передбачала виведення на стаціонарні орбіти не менше 24 супутників. Початкова вартість проекту сягала 12 млрд доларів. Перший супутник запущено у 1978 р., а повністю систему було розгорнуто лише у 1994 р. У 2000 р. рішенням президента США відключено так званий селективний доступ (Selective Availability, або S/A – штучне заниження точності визначення координат до 100 м), що підвищило точність звичайних GPS-приймачів до 5–15 м.

Структура GPS. GPS має три головні сегменти: управління, космічний і користувачів. Сегмент управління складається з головної станції контролю й управління, групи контрольних станцій і станцій зв'язку. Головна станція контролю й управління розташована разом з однією із контрольних станцій на авіабазі "Шривер" (Schriever Air Force Base) поблизу м. Колорадо-Спрингс (штат Колорадо). Контрольні станції та станції зв'язку розміщено на атолі Дієго-Гарсія (Індійський океан), на острові Вознесіння (Атлантичний океан), на Гавайських островах, атолі Кваджалейн (Тихий океан), мисі Канаверел (півострів Флорида). Контрольні станції ведуть спостереження за супутниками та здійснюють високоточне визначення до них відстаней. За цими даними головна станція визначає параметри орбіт, похибки бортових годинників, визначає коефіцієнти моделі іоносфери й формує повідомлення, які станції зв'язку передають на борт супутників. У 2005 р. систему

контрольних станцій розширено завдяки під'єднанню до системи станцій Національного агентства геопросторової розвідки США (National Geospatial-Intelligence Agency).

Космічний сегмент GPS представлений угрупованням із 24 супутників (може бути й більше), які рухаються по орбітах у шести площинах (по 4 супутники у кожній), нахилених до площини екватора під кутом 55° і повернутих одна до одної на 60° по довготі (рис. 54). Ексцентриситет орбіт становить від 0,02 до 0,001 – орбіти близькі до колових. Висота обертання супутників дорівнює приблизно 20 150 км, період обертання – 11 годин 58 хвилин.

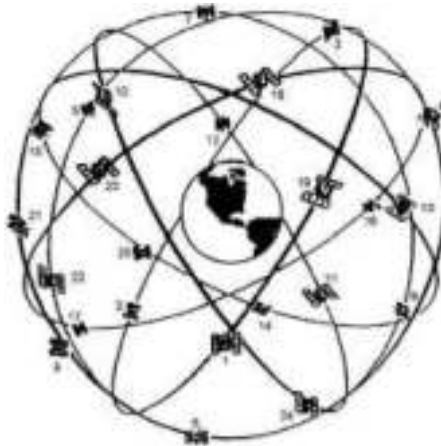


Рис. 54. Угруповання супутників системи GPS

Обертаючись навколо планети, супутники повторюють свою траєкторію і взаємне розташування щодоби та двічі на добу пролітають над контрольними станціями. Це дає змогу точно визначати їхнє просторове положення, висоту і швидкість. Відхилення від теоретичних орбіт, які виявляють контрольні станції, називають “похибками ефемерид”. Вони зазвичай незначні, зумовлені гравітаційним притяганням Місяця та Сонця. Після того, як одна із станцій стеження визначила положення супутника та розрахувала поправки до його орбіти, така оновлена інформація передається на супутник, замінюючи в пам’яті його бортового комп’ютера попередню інформацію. Параметри орбіт і швидкості польоту супутників підібрано таким чином, що у будь-якій точці на поверхні Землі в кожний момент часу GPS-приймач може отримувати сигнал від 5–8 супутників.

Кожний супутник GPS у неперервному режимі (кожні 30 секунд) передає навігаційні повідомлення, які містять його

індивідуальні віддалемірні коди (загальнодоступний цивільний С/А-код і захищений Р-код військового призначення), відомості про положення супутника на орбіті у певний час, положення решти супутників (альманах), стан бортових систем та іншу службову інформацію.

Сегмент користувачів складається з GPS-приймачів різних типів, які за сигналами від супутників визначають місце перебування та параметри руху (рис. 55).



Рис. 55. Обладнання сегменту GPS-користувачів:

- 1 – геодезичні приймачі; 2 – морські навігаційні приймачі;
- 3 – автомобільні GPS-навігатори; 4 – картографічні GPS-приймачі;
- 5 – засоби персональної навігації; 6 – прилади моніторингу

GPS-приймач може:

- визначати географічні координати місця перебування;
- обчислювати пройдenu відстань, миттєву та середню швидкість, час прибуття у задану точку;
- рисувати на екрані маршрут переміщення;
- вести маршрутом до пункту призначення;
- обчислювати відстань між двома точками й азимут між ними;
- обчислювати схід-захід сонця у будь-якій точці світу на довільну дату і час та інше.

У сучасних комплектаціях персональні й автомобільні приймачі, крім базових навігаційних, мають широкий набір інших сервісних функцій, як можливість відтворення аудіо- та відеофайлів, прийому і передачі електронної пошти тощо.

GPS-приймачі використовують для навігації, визначення координат, часу поширення сигналу та інших досліджень. Для високоточних вимірювань у геодезії та геодинаміці використовують спеціалізовані двочастотні багатоканальні приймачі. Для навігації, моніторингу транспортних засобів і широкого кола інших подібних задач застосовують значно простіші та дешевші приймачі, здатні виконувати вимірювання тільки спостереженням за кодом сигналів.

Загальний принцип роботи. Принцип роботи супутникових систем навігації ґрунтується на вимірюванні відстаней від антени на об'єкті (координати якого потрібно знайти) до супутників, розташування яких відоме з великою точністю. Таблицю позицій усіх супутників називають *альманахом*. Як правило, приймач зберігає альманах у пам'яті з часу останнього включення і, якщо він не застарів, – миттєво використовує. Кожний супутник передає у своєму сигналі інформацію про весь альманах. Для обчислення відстані до супутників GPS-приймач визначає час проходження радіосигналу від космічного апарату до його антени.

В основі способу визначення відстані лежить відносно стала швидкість поширення радіохвиль, яка відома. Для вимірювання часу поширення радіосигналу кожний супутник навігаційної системи передає значення точного часу у складі свого сигналу, використовуючи точно синхронізовані атомні годинники. Під час роботи GPS-приймача його годинник синхронізується зі системним часом і при подальшому прийомі сигналу вираховується затримка між часом випромінювання, який закладений у самому сигналі, та часом прийому сигналу. Знаючи відстані до кількох супутників системи, за допомогою звичайних геометричних побудов, на основі альманаху, можна знайти положення об'єкта у просторі. Маючи таку інформацію, навігаційний приймач обчислює свої координати. Додатково збираючи й опрацьовуючи ці дані за певний період часу, стає можливо визначити такі параметри руху як швидкість (актуальна, максимальна, середня), пройдений шлях і т.д.

Головна ідея визначення місця розташування. Координати точки перебування на Землі GPS-приймач розраховує на основі визначення відстаней до групи супутників у космосі. Супутники відіграють роль точок відліку з відомими координатами. Схематично це можна пояснити таким чином. Припустимо, приймач визначив відстань від точки нашого перебування до одного із супутників А, яка дорівнює 21 000 км. Точка перебування лежатиме десь на уявній сфері з центром у супутнику А і радіусом 21 000 км (рис. 56, а).

Визначивши також відстань до другого супутника В, яка, наприклад, буде 22 000 км, приймач суттєво зменшує ділянку пошуку. Єдиною областю простору, де ми будемо на відстані 21 000 км від супутника А і 22 000 км від супутника В, є точки перетину двох сфер, які утворюють коло (рис. 56, б). Коли наш прилад визначить відстань ще й до третього супутника, то пошук місця розташування зведеться до розрахунку координат двох точок (рис. 57).

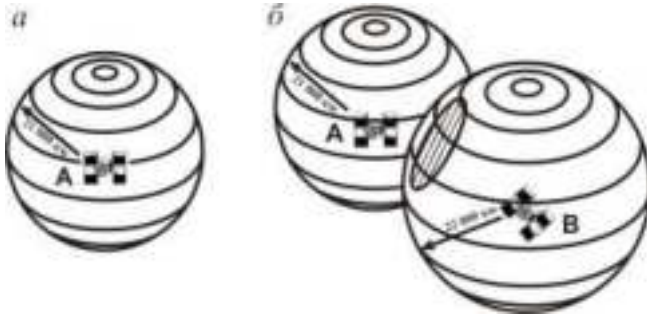


Рис. 56. Визначення положення точки за радіосигналами від одного (а) та двох (б) супутників



Рис. 57. Визначення положення точки за радіосигналами від трьох супутників

Справді, коли відомо, що ми в один і той же момент часу перебуваємо на відстані 23 000 км ще й від супутника С, то є тільки дві точки у просторі, де це можливо. Ці точки є перетинами сфери радіусом 23 000 км з колом, отриманим від перетину сфер радіусами 21 000 і 22 000 км.

Як правило, одна із цих точок розташована або надто далеко від поверхні Землі, або має велику швидкість переміщення. Тобто одну із точок прилад може відкинути під час розрахунку як неможливу. Насправді приймачу з технічних причин потрібно визначити віддаль ще й до четвертого супутника, а тоді одна із точок відпаде автоматично, оскільки не лежатиме на сфері четвертого супутника.

Вимірювання відстані до супутника. Розрахунок координат, як зазначено вище, GPS-приймач може виконати, визначивши віддалі до чотирьох супутників. Для цього приймач має виміряти час, за який радіосигнал від супутника прийшов до нього, а потім за

вимірним часом обчислити відстань. Радіохвилі поширюються зі швидкістю світла – близько 300 000 км/с. Якщо відомо момент часу, у який супутник почав передачу сигналу, і момент часу, коли цей сигнал надійшов до приймача, то можна знайти час, за який радіосигнал подолав відстань між ними. Помноживши цей час на швидкість поширення сигналу, знайдемо шукану відстань. Звичайно, для вимірювання часу годинники мають бути дуже точні. У системі час вимірюють з наносекундною точністю. Головною проблемою у вимірюваннях часу є точне фіксування моменту часу, у який сигнал послано супутником. Для цього синхронізували супутники і приймачі так, щоб вони генерували один і той самий бінарний код точно в один час. Приймач, отримавши сигнал від супутника, порівнює його зі своїм і визначає час, який минув від моменту, коли він генерував такий самий кодовий сигнал. Виявлене таким способом зміщення одного коду щодо іншого буде відповідати часу Δt проходження сигналом відстані від супутника до приймача.

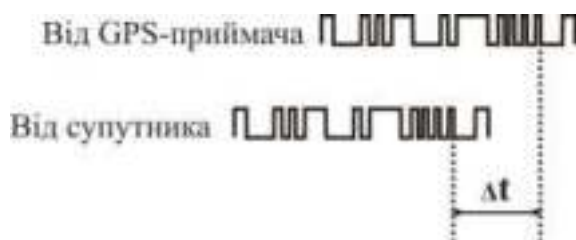


Рис. 58. Часова затримка радіосигналу від супутника

Як супутники, так і приймачі генерують дуже складні цифрові кодові послідовності. Коди ускладнюють спеціально, щоб їх можна було надійно та однозначно порівнювати, а також з інших причин. Коди настільки складні, що подібні на довгий ряд випадкових імпульсів. Але насправді це ретельно підібрані, майже випадкові послідовності логічних нулів і одиниць, які повторюються кожної мілісекунди. Через це їх часто розглядають як “псевдовипадкові” коди.

Синхронізація системи у часі. Як відомо, електромагнітна хвиля поширюється у вакуумі зі швидкістю близько 300 000 км/с. Якщо у супутника і приймача є певна розбіжність шкали часу (виходять зі синхронізації) навіть на 0,01 с, то шукана відстань буде визначена з похибкою у 3000 км! Для якомога точнішого відліку часу на супутниках встановлюють “атомні” годинники. Вони винятково точні та дуже дорогі (близько 100 000 доларів). На кожному супутнику встановлено декілька таких годинників, щоб

гарантувати надійність і точність у роботі системи. Атомні годинники отримали свою назву від того, що у них як “метроном” використовують коливання атомів спеціально підібраної речовини. Якщо встановлення на супутнику такого годинника економічно обгрунтоване, то обладнання ними приймачів сигналу буде дуже дорогим задоволенням. На щастя, знайшли спосіб обійтися годинниками помірної точності. Ідея способу є фундаментальною у роботі GPS і полягає в тому, що приймач синхронізує свій годинник зі системним часом, використовуючи радіосигнали від чотирьох супутників. Для визначення положення точки у просторі приладу потрібно три точних виміри часу поширення сигналу від супутників. Оскільки технічно синхронізувати годинники неможливо, то радіосигнали від чотирьох супутників навіть із неточними значеннями про час поширення сигналу дають змогу виявити зміщення шкали часу приймача і визначити положення точки перебування. На перший погляд це виглядає нелогічно, але це єдиний вихід у такій ситуації. Простіше це пояснити за допомогою рисунків. Рисунки значно легше побудувати, якщо обмежитися двовимірним простором, тобто вирішувати задачу визначення положення на площині. Звичайно, GPS – тривимірна система, але принцип використовує такий самий.

Зазвичай відстань до супутника вимірюють у метрах. Проте її можна подати і через одиниці часу – секунди, які, власне, і вимірює приймач. Так буде простіше показати, як похибка у часі впливає на визначення точки перебування. Припустимо, що ми перебуваємо у 4 секундах від супутника А і в 6 секундах від супутника В (рис. 59). Цих двох вимірів було б достатньо для визначення положення на площині. Позначимо її "X". Це точка нашого фактичного перебування, і вона була б однозначно знайдена за умови, якщо годинник приймача синхронізований із годинником супутників.

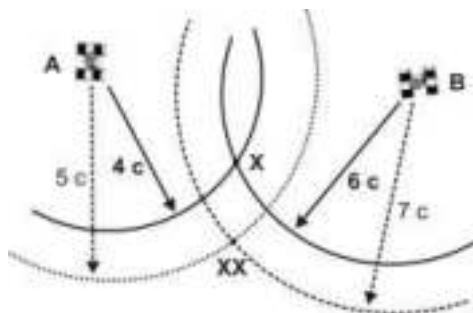


Рис. 59. Вплив похибки годинника приймача на визначення точки перебування

Якщо годинник приймача відстає на одну секунду, то визначена відстань від супутника А буде 5 секунд, а від супутника В – 7 секунд. Відповідно, можна показати два нові кола, які перетинаються у точці "XX". Визначені приладом координати були б цілком реалістичні, але вони не відповідали б реальним. Щоби позбутися похибки по часу у двовимірному випадку потрібне ще значення відстані до третього супутника. Припустимо (якщо годинник приладу синхронізований), супутник С перебуває у 8 секундах від точки нашого перебування. Ситуація виглядала б як на рис. 60, на якому показано фактичне розташування точки. Усі три кола тоді перетинаються у точці X, оскільки відповідають фактичним віддалям від супутників. У разі похибки по часу на 1 секунду матимемо три точки перетину точкових кіл, які відповідають не точним відстаням, а так званим *псевдовідстаням*, тобто відстаням, визначеним за неточним годинником приймача. Слід звернути увагу на те, що кола, якими показані псевдовідстані від супутників А і В, перетинаються у точці XX, а відповідне коло від супутника С проходить на певній відстані від них. Тобто немає у просторі точки, яка б на один момент часу була віддалена на 5, 7 і 9 секунд від супутників А, В і С відповідно. Комп'ютери приймачів запрограмовані таким чином, що коли до них надходять виміри, які не дають перетину в одній точці, то вони визначають, що годинник дає похибку і йде із певним випередженням або запізненням щодо системного часу. Комп'ютер приймача починає віднімати (або додавати) певне (одне і те ж для всіх вимірів) значення часу у виразах для визначення псевдовідстаней. Процедура коректування по часу приймач продовжує до тих пір, поки не знайде рішення, яке проводить усі кола через одну точку. У нашому прикладі він просто виявить, що це досягається відкиданням секунди від усіх вимірів часу. Звідси буде зроблено висновок, що годинник приймача відстає на 1 секунду. Насправді комп'ютер не хаотично шукає відповідь. Він розв'язує чотири рівняння з чотирма невідомими і швидко знаходить результат.

Отже, для точного визначення трьох координат – довготи, широти і висоти точки над прийнятим у розрахунках земним еліпсоїдом приймач має отримати сигнали не менше як від чотирьох супутників. Ця умова має значення для проектування GPS-приймачів. Для безперервного визначення координат у реальному часі потрібен прилад, оснащений щонайменше чотирма каналами вимірювань, щоб із кожним супутником працював окремий канал. У більшості випадків немає такої узгодженої

одночасності у вимірюваннях, тому на практиці використовують простіший і дешевший одноканальний приймач.

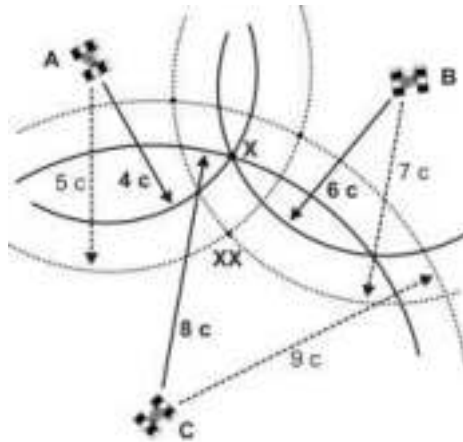


Рис. 60. Використання третього супутника для усунення похибки годинника GPS-приймача

Одноканальному приймачу для визначення координат потрібно виконати чотири окремих розрахунки за сигналами з чотирьох супутників. Ця операція може тривати від 2 до 30 с. На жаль, такий приймач не так успішно розв'язує задачу щодо зміни швидкості руху основи, на якій він встановлений. Крім того, будь-який рух приймача під час циклу чотирьох послідовних вимірювань може вплинути на їх точність. Процес визначення місця перебування переривається щоразу, коли супутники передають свої інформаційні повідомлення (прийом і розшифрування таких посилок займає 30 с.). Компромісним варіантом є двоканальний приймач, один канал якого виконує опрацювання часових вимірювань, тоді як другий налаштовує контакт із черговим супутником для здійснення вимірювань. Після того як перший канал закінчить частковий цикл обробки даних, він зможе миттєво під'єднатися до чергового супутника без втрати часу на його пошук і прослуховування. Тим часом другий канал, який ще називають адміністративним, звертається до наступного супутника і виконує налаштування та синхронізації із його сигналами. Якщо виявиться, що другий канал більше не потрібний для адміністративних справ, він, як і перший, може бути використаний для виконання й опрацювання часових вимірювань. У роботі за такою схемою досягається неперервне поновлення координат точки перебування.

Похибки визначення координат. Найбільші похибки у визначенні координат пов'язані із затримкою радіосигналу під час проходження іоносфери – шару заряджених частинок на висоті від 50 до 1000 км. Ці частинки відчутно впливають на швидкість поширення світла і радіохвиль. Швидкість світла є константою лише у вакуумі, який властивий далекому космосу. Коли світло або радіохвилі проходять крізь щільніше середовище (наприклад, шар заряджених частинок), швидкість їхнього поширення трохи зменшується. Це ускладнює визначення відстані до супутників, якщо розрахунки побудовані на припущенні про сталу швидкість радіосигналу.

Якими б точними не були атомні годинники на супутниках, але і вони стають причиною незначних похибок.

Сфери застосування систем навігації:

- *геодезія*: за допомогою систем навігації визначають точні координати точок і межі земельних ділянок;

- *картографія*: системи навігації використовують у цивільній і військовій картографії;

- *навігація*: із застосуванням систем навігації здійснюють як морську, так і дорожню навігацію;

- *супутниковий моніторинг транспорту*: за допомогою систем навігації ведуть моніторинг за напрямком руху автомобіля, його швидкістю;

- *стільниковий зв'язок*: перші мобільні телефони з GPS з'явилися у 90-х роках. У деяких країнах (наприклад, США) це використовують для оперативного визначення місця перебування людини, яка дзвонить 911. У Росії в 2010 р. розпочато реалізацію аналогічного проекту – Ера-ГЛОНАСС;

- *геотектоніка*: за допомогою систем навігації здійснюють спостереження за рухами земної кори;

- *активний відпочинок*: створено різні ігри, у яких використовують системи навігації (наприклад, геокешинг);

- *геотеґінг*: інформацію (наприклад, фотографії) “прив'язують” до координат завдяки вбудованим або зовнішнім GPS-приймачам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Божок А.П.* Топографія с основами геодезії : учебн. для студ. географ. спец. ун-тов / А.П. Божок, К.И. Дрич, С.А. Евтифеев и др.; под ред. А.С. Харченко и А.П. Божок. М.: Высшая школа, 1986. 304 с.
2. *Борщ-Компониец В.И.* Геодезия. Маркшейдерское дело : учебник / В.И. Борщ-Компониец. М. : Недра, 1989. 511 с.
3. *Білокриницький С.М.* Геодезія : навч. посіб. / С.М. Білокриницький. Чернівці : Чернів. нац. ун-т, 2014. 575 с.
4. *Геодезія у природокористуванні : навч. посіб. / Б. Волосецький.* Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 289 с.
5. *Земледух Р.М.* Картографія з основами топографії : навч. посіб. / Р.М. Земледух. К. : Вища школа, 1993. 456 с.
6. *Картографія с основами топографії : учеб. пособие для студ. пед. ин-тов / Г.Ю. Грюнберг [и др.]; под ред. Г.Ю. Грюнберга.* М. : Просвещение, 1991. 367 с.
7. *Маслов А.В.* Геодезия : [учеб. пособие для вузов] / А.В. Маслов, А.В. Гордеев, Ю.Г. Батраков. М.: Недра, 1980. 616 с.
8. *Островський А.Л.* Геодезія. Ч. 1. Топографія : навч. посіб. / А.Л. Островський, О.І. Мороз, З.Р. Тартачинська, І.Ф. Гарасимчук. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2011. 440 с.
9. *Парамонов А.Г.* Основы топографии и аэрофотосъемки : учеб. пособие для вузов / А.Г. Парамонов, В.Д. Сомов, Н.В. Черноглазов. М. : Недра, 1991. 236 с.
10. *Пастух В.В.* Основы топографії : підручник / В.В. Пастух, Г.Ф. Виноградов. К. : ВЦ "Київський університет", 2000. 372 с.
11. *Ратушняк Г.С.* Топографія з основами картографії : навч. посіб. / Г.С. Ратушняк. К. : Центр навч. літ-ри, 2003. 208 с.
12. *Ремінський А.А.* Геодезія : навч. посіб. / А.А. Ремінський, С.В. Рибалко. Ч. 1. Х. : Харків. держ. аграр. ун-т ім. В.В. Докучаєва, 1996. 209 с.
13. *Ремінський А.А.* Геодезія : навч. посіб. / А.А. Ремінський, С.В. Рибалко. Ч. 2. Х. : Харків. держ. аграр. ун-т ім. В.В. Докучаєва, 1997. 137 с.
14. *Роцин О.М.* Цікава геодезія / О.М. Роцин. К.: Радянська школа, 1973. 160 с.

ДЛЯ ПОДАТОК

ДЛЯ ПОДАТОК